



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**STEREO AUDIO VÝKONOVÝ ZESILOVAČ S  
MIKROKONTROLÉREM**

STEREO AUDIO POWER AMPLIFIER WITH MICROCONTROLLER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Patrik Filko**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.**

**BRNO 2017**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Patrik Filko

**ID:** 164264

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Stereo audio výkonový zesilovač s mikrokontrolérem

### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte zapojení stereo audio výkonového zesilovače s výstupním výkonem 2 x 100 W, jehož vybrané funkce budou řízeny mikrokontrolérem. Pro koncový stupeň navrhněte korekční předzesilovač pro řízení hlasitosti, hloubek, výšek a balance. Funkce dílčích zapojení ověřte simulacemi v PSpice a navrhněte desky plošných spojů v Eagle.

Pro výkonový zesilovač navrhněte vhodnou napájecí jednotku, včetně transformátoru. Proveďte implementaci vybraného mikrokontroléru pro řízení zobrazovacích funkcí na panelu zesilovače. Výkonový zesilovač realizujte, oživte a proměřte jeho základní parametry. Diskutujte výsledky měření a srovnajte je s výsledky počítačové simulace.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CORDELL, B. Designing Audio Power Amplifiers. New York: McGraw Hill, 2011.

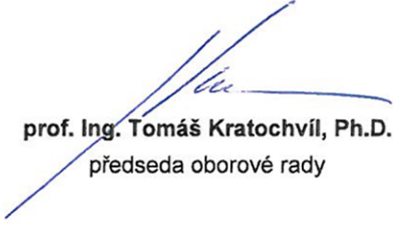
[2] BRTNÍK, B., MATOUŠEK, D. Mikroprocesorová technika. Práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4 - ATXmega16. Praha: BEN - technická literatura, 2011.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 30.5.2017

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

**Konzultant:**

  
prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.  
předseda oborové rady



### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom stereo audio výkonového zosilňovača ktorého vybrané funkcie, ako sú riadenie hlasitosti, hĺbok, výšok a balance, ovláda cez digitálne potenciometre šestnásťbitový mikrokontrolér. Nastavenie vybraných funkcií je zobrazované na jednoduchom LCD displeji. Navrhovaný zosilňovač je jednoduchý na obsluhu a teda nachádza uplatnenie v širokom spektre zvukových zariadení, ako je napríklad zosilnenie vstupného signálu z prehrávača prenosových zvukových médií alebo na zosilnenie audio signálu v televíznej technike. Vlastný návrh je možné realizovať z bežne dostupných súčiastok.

## **Kľúčové slová**

zosilňovač, mikrokontrolér, trieda, nízkofrekvenčný, predzosilňovač, signál, digitálne potenciometre

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with designing stereo audio power amplifier, which specified functions such as control of volume, depths, treble and balance, are controled by 16-bit microcontroler with digital potentiometers. Setting those functions is pictured on simple LCD display. Opted amplifier is easy to control ergo it finds use in wide spectre of audio devices such as ampliffing input signal from transmission audio media player or audio signal in television devices. Used design is able to be realized of easy to get components.

## **Key words**

amplifier, microcontroler, class, low frequency, preamplifier, signal, digital potentiometers

**Bibliografická citácia**

FILKO, P. *Stereo audio výkonový zesilovač s mikrokontrolérem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 64s.  
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc..



## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Stereo audio výkonový zosilňovač s mikrokontrolérom som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorská práva tretích osôb, ani som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29.5.2017

.....

podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu mojej semestrálnej práce prof. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

Ďalej chcem poďakovať mojej rodine a priateľom za podporu a pomoc počas môjho štúdia.

# OBSAH

ÚVOD .....	10
1 NÍZKOFREKVENČNÉ ZOSILŇOVAČE .....	11
1.1 Vysvetlenie základných pojmov .....	11
1.2 Základné parametre zosilňovačov .....	12
1.3 Rozdelenie zosilňovačov podľa vstupného signálu .....	15
1.3.1 Predzosilňovače .....	15
1.3.2 Koncové (výkonové) zosilňovače .....	17
1.3.2.1 Najpoužívannejšie pracovné triedy výkonových zosilňovačov .	17
1.3.2.2 Špeciálne triedy zosilňovačov .....	20
1.4 Integrované výkonové zosilňovače .....	21
2 NÁVRH STEREO AUDIO ZOSILŇOVAČA .....	23
2.1 Návrh audio zosilňovača – bloková schéma .....	23
2.2 Návrh korekčného predzosilňovača .....	24
2.2.1 Popis obvodu LM1036N .....	24
2.2.2 Základné parametre obvodu LM1036N .....	25
2.2.3 Návrh zapojenia predzosilňovača.....	26
2.2.3.1 Schéma zapojenia .....	26
2.2.3.2 Popis zapojenia.....	27
2.2.3.3 Funkcia digitálnych potenciometrov DS1804-50.....	28
2.3 Programové vybavenie mikrokontroléra ATMEGA 16.....	29
2.3.1 Vývojový diagram programu pre obsluhu potenciometrov .....	30
2.3.2 Hlavné dátové štruktúry programu.....	31
2.3.3 Zobrazovacia jednotka a zobrazovanie na displej .....	33
2.4 Návrh výkonového zosilňovača. ....	33
2.4.1 Popis a vnútorná štruktúra obvodu TDA 7294.....	33
2.4.2 Základné parametre obvodu .....	34
2.4.3 Návrh zapojenia výkonových stupňov .....	35
2.4.4 Schéma zapojenia obvodu a jeho popis.....	36

3	NÁVRH NAPÁJACIEHO ZDROJA .....	38
3.1	Schéma zapojenia napájacieho zdroja.....	38
3.2	Popis schémy zdroja.....	38
3.3	Výpočet symetrického zdroja napätia .....	39
3.4	Výpočet napätia nesymetrického zdroja .....	41
4	CHLADENIE .....	42
4.1	Výpočet potrebného chladiča .....	42
5	NÁVRH A VÝROBA DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV.....	44
5.1	Návrh DPS predzosilňovača s mikrokontrolérom.....	44
5.2	Návrh DPS výkonových stupňov .....	44
5.3	Návrh DPS zdroja napätia .....	44
5.4	Návrh DPS ovládacieho panelu .....	44
6	MERANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV.....	45
6.1	Meranie korekčného predzosilňovača.....	45
6.1.1	Meranie modulovej kmitočtovej charakteristiky.....	45
6.1.2	Meranie závislosti regulácie hlasitosti .....	46
6.1.3	Meranie závislosti regulácie vyváženia.....	47
6.1.4	Meranie presluchoch medzi kanálmi .....	48
6.1.5	Meranie vstupného odporu.....	48
6.1.6	Meranie harmonického skreslenia.....	49
6.1.7	Použité prístroje.....	49
6.2	Meranie výkonového zosilňovača.....	50
6.2.1	Meranie modulovej kmitočtovej charakteristiky.....	50
6.2.2	Meranie maximálneho výstupného výkonu .....	51
6.2.3	Meranie účinnosti .....	52
6.2.4	Meranie vstupného odporu.....	53
6.2.5	Meranie výstupného odporu.....	53
6.2.6	Činiteľ tlmenia záťaže .....	53
6.2.7	Meranie rýchlosti prebehu SR (Slew Rate).....	54
6.2.8	Meranie harmonického skreslenia.....	54

6.2.9 Použité prístroje.....	55
7 FOTODOKUMENTÁCIA .....	56
ZÁVER .....	58
LITERATÚRA.....	60
ZOZNAM OBRÁZKOV .....	62
ZOZNAM TABULIEK.....	63
ZOZNAM GRAFOV .....	63
ZOZNAM PRÍLOH .....	64

# ÚVOD

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh stereo audio výkonového zosilňovača s výstupným výkonom  $2 \times 100\text{W}$ . Audio nízkofrekvenčné zosilňovače sú v dnešnej dobe skoro neodmysliteľnou súčasťou života človeka. Sú použité v najrôznejších zariadeniach ako napríklad rádiové prijímače, televízne prijímače, rozhlas a samozrejme široké uplatnenie získavajú aj v hudobnom priemysle a v mnohých ďalších odvetviach. Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom, realizáciou a meraním takéhoto nízkofrekvenčného zosilňovača, ktorého riadenie vybraných funkcií bude prevádzané mikrokontrolérom.

V prvej kapitole práce sú objasnené pojmy z nízkofrekvenčnej techniky, bližšie popísaná problematika celého zadania a existujúce možnosti a spôsoby jeho riešenia.

V druhej kapitole práce je spísaný návrh konkrétneho riešenia stereo audio zosilňovača, spracovaný popis a spôsob zapojenia jeho jednotlivých častí a obvodov korigujúcich jeho parametre.

V tretej a štvrtej kapitole je popísaný, spracovaný a vypočítaný návrh jednej napájacej jednotky pre výkonovú časť zosilňovača a druhej pre ostatné obvody riadenia a korekcie signálu. K výkonovej časti zosilňovača je navrhnutý aj potrebný chladič pre odvod tepla stratového výkonu.

V piatej kapitole sú bližšie spísané spôsoby výroby dosiek plošných spojov pre jednotlivé obvody.

Šiesta kapitola sa zaoberá meraním základných parametrov zosilňovača. V jej prvej časti sú spísané výsledky meraní korekčného predzosilňovača a druhá časť sa zameriava na výsledky merania parametrov výkonových stupňov.

Posledná siedma kapitola vyobrazuje konečné konštrukčné riešenie zadania.

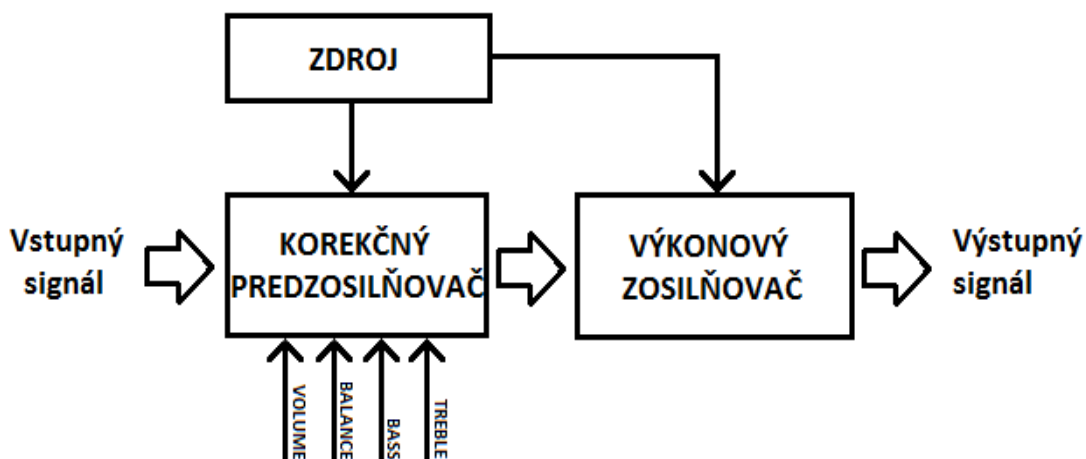
# 1 NÍZKOFREKVENČNÉ ZOSILŇOVAČE

## 1.1 Vysvetlenie základných pojmov

Nízkofrekvenčný zosilňovač je zariadenie, ktorého úlohou je zosilniť vstupný nízkofrekvenčný signál na požadovanú úroveň, ktorá bude vhodná ako výstupná úroveň pre zariadenie, ktoré premieňa elektrickú energiu na mechanickú vo forme zvuku, teda reproduktor. Za takýto signál sú považované frekvencie, ktoré sú človekom počuteľné, teda spektrum frekvencií od 20 Hz do 20 kHz [3].

Zosilňovače sa delia podľa rôznych kritérií a to napríklad podľa polohy pracovného bodu, kde patria triedy A, B, AB, C, D atd., podľa frekvenčného rozsahu alebo podľa zapojenia tranzistorov (SC, SB, SE). Rovnako sa delia podľa konštrukcie a použitých aktívnych súčiastok, kde patria zapojenia tranzistorové, zosilňovače s integrovanými obvodmi, elektrónkové alebo magnetické [3].

Vo všeobecnosti je nízkofrekvenčný audio zosilňovač zariadenie, pozostávajúce z troch hlavných blokov a to zo zdroja napätia, korekčného predzosilňovača a výkonového zosilňovača (obr. 1) [3].



Obr. 1: Bloková schéma nízkofrekvenčného audio zosilňovača (vlastné spracovanie)

## 1.2 Základné parametre zosilňovačov

Návrh zosilňovača a požiadavky na jeho správnu funkčnosť sú riadené účelom jeho použitia. Najdôležitejšie charakteristické parametre udávané u zosilňovačov sú tieto:

- **Zosilnenie (činiteľ zosilnenia) a zisk**

Zosilnenie je pomerová veličina definovaná ako podiel výstupnej veličiny ku vstupnej veličine. V tomto vyjadrení zosilnenia sa jedná o bezrozmerné číslo. Najčastejšie sa v literatúre uvádza napät'ové zosilnenie rovnako tak aj výkonové a prúdové zosilnenie [3].

$$A_U = \frac{U_2}{U_1} \quad (1.1)$$

$$A_I = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.2)$$

$$A_P = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.3)$$

V prípade vyjadrenia zosilnenia pomocou logaritmických jednotiek, teda decibelov, sa jedná o zisk (angl. gain). Potom je napät'ový, prúdový a výkonový zisk definovaný [3]:

$$a_u = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \text{ [dB]} \quad (1.4)$$

$$a_i = 20 \log \frac{I_2}{I_1} \text{ [dB]} \quad (1.5)$$

$$a_p = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ [dB]} \quad (1.6)$$

- **Frekvenčná a fázová charakteristika zosilňovača**

Frekvenčná charakteristika definuje závislosť medzi zosilnením a frekvenciou. V pásme frekvencií, ktoré sú zosilňované by malo byť zosilnenie konštantné. Avšak výstupné napätie má kvôli oneskoreniu signálu prechádzajúceho zosilňovačom inú fázu ako vstupné napätie. Namiesto zakreslenia zosilnenia do komplexných súradníc sa v praxi kvôli názornosti zvlášť zakresľuje amplitúda a fáza v závislosti na frekvencií [3].



- **Pásmo priepustnosti zosilňovača**

Pásmo priepustnosti sa určuje z frekvenčnej charakteristiky ako rozdiel medzi dolnou medznou frekvenciou a hornou medznou frekvenciou. Jednotlivé medzné frekvencie sú definované poklesom zosilnenia o 3dB oproti frekvencií niekde v strede pásma, napríklad v nízkofrekvenčnej technike sa môže jednať o hodnotu 1kHz [3].

- **Skreslenie a jeho druhy**

Skreslenie je definované ako odlišnosť tvaru priebehu výstupného napätia od vstupného. Existuje viacero skreslení a činiteľov skreslenia uvádzaných v literatúrach. Medzi najznámejších z nich patrí činiteľ harmonického skreslenia a intermodulačné skreslenie [1].

Harmonické skreslenie je jedným z druhov nelineárneho skreslenia a jeho činiteľ je vyjadrený v percentách. Jeho veľkosť, teda veľkosť činiteľa harmonického skreslenia, udáva koľko percent zmesi vyšších harmonických zložiek generovaných zosilňovačom, tvorí užitočný harmonický signál. Je závislý na veľkosti výstupného napätia, výkonu a na frekvencii [5].

Intermodulačné skreslenie je tiež jedným z druhov nelineárneho skreslenia, ktoré vzniká vplyvom nelinearity VA charakteristík jednotlivých prvkov po privedení dvoch harmonických signálov na vstup zosilňovača. Je definované ako vznikajúce súčtové a rozdielové zložky. Činiteľ intermodulačného skreslenia sa označuje písmenom  $m$  a udáva úroveň nežiadúcich kombinovaných zložiek v percentách. [4].

- **Menovitý výstupný výkon zosilňovača**

Častokrát nazývaný aj trvalý výkon zosilňovača udáva veľkosť výkonu signálu sínusového tvaru, ktorý je zosilňovač schopný dodávať do záťaže po dobu 10 minút a pri dodržaní preddefinovanej veľkosti činiteľa skreslenia. Veľkosť výstupného výkonu sa počíta podľa vzťahu (2.7), kde  $P_{OUT}$  je výstupný výkon,  $U_{OUT}^2$  je kvadrát výstupného napätia a  $R_Z$  je zaťažovacia impedancia. Veľkosť výstupného výkonu zosilňovača je obmedzená skresleniami, preto sa udáva maximálny výstupný výkon pri definovanom skreslení [1].

$$P_{OUT} = \frac{U_{OUT}^2}{R_Z} \quad [W] \quad (1.7)$$

- **Účinnosť zosilňovača**

Účinnosť zosilňovača je definovaná ako časť vstupného príkonu ktorá sa premení na efektívny výstupný výkon pričom ostatná časť príkonu sa vyžiarí do okolia vo forme tepla. Jej veľkosť sa udáva v percentách [1].

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1.8)$$

- **Vstupná a výstupná impedancia zosilňovača**

Vstupná impedancia je udávaná ako pomer napätia na vstupných svorkách zosilňovača k prúdu ktorý vstupnými svorkami do zosilňovača vteká [1].

Výstupná impedancia je daná pomerom napätia na výstupných svorkách zosilňovača naprázdno a výstupného prúdu, ktorý je zosilňovač schopný dodať pri skratovaných výstupných svorkách [5].

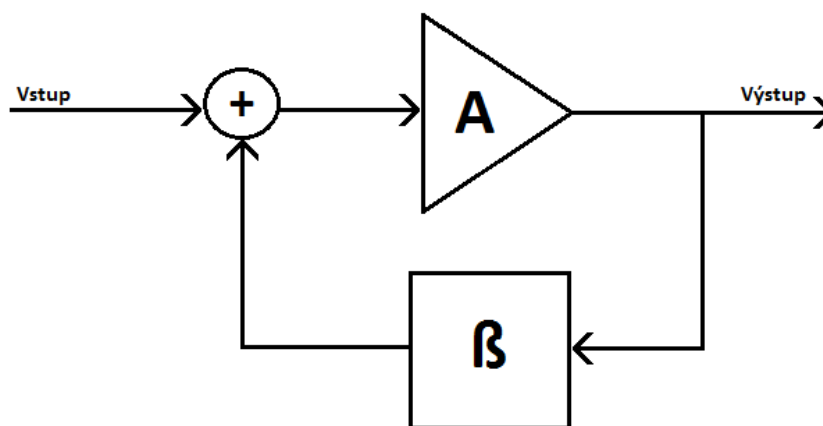
- **Presluch**

Presluch je vzájomné ovplyvňovanie dvoch prenosových kanálov medzi sebou. Rozlišujú sa dva druhy presluchu a to presluch medzi jednotlivými vstupmi a medzi kanálmi rovnakého vstupu. Presluchy môžu vznikáť priamo už vo vstupných konektoroch, v prepínačoch vstupu alebo pri paralelnom vedení dvoch netienených vodičov a v mnohých iných prípadoch. Norma HiFi udáva, že presluch pri frekvencii 1000Hz by mal byť medzi dvoma rôznymi vstupmi maximálne -50 dB a medzi jednotlivými kanálmi maximálne -40dB [5].

- **Spätná väzba**

Spätná väzba je definovaná ako časť zosilneného signálu z výstupu zosilňovača, ktorý je privedený späť na jeho vstup. Rozlišujú sa dva základné druhy spätnej väzby a to kladná a záporná spätná väzba. Pokiaľ sa výsledný prenos medzi pôvodným signálom a signálom privedeným z výstupu znižuje, jedná sa o zápornú spätnú väzbu, v opačnom prípade sa jedná o kladnú spätnú väzbu [3].

Záporná spätná väzba znižuje harmonické, frekvenčné a fázové skreslenie, zväčšuje stabilitu zosilňovača, znižuje rušenie a zosilnenie. Naopak kladná väzba zväčšuje zosilnenie zosilňovača ale zväčšuje aj jeho skreslenia a za určitých podmienok mení zosilňovač na oscilátor [3].



Obr. 2: Bloková schéma zosilňovača so spätnou väzbou (vlastné spracovanie)

### 1.3 Rozdelenie zosilňovačov podľa vstupného signálu

Nízkofrekvenčné zosilňovače môžu byť rozdeľované podľa veľkosti vstupného (budiaceho) signálu. V tomto kritériu sa rozdeľujú na predzosilňovače a koncové (výkonové) zosilňovače [1].

#### 1.3.1 Predzosilňovače

Predzosilňovače sú jedným z typov zosilňovačov, ktoré majú veľké napäťové zosilnenie a zosilňujú signály priamo pochádzajúce zo zdroja signálu. Ich prvou funkciou je teda úrovňovo prispôbiť vstupný signál k požadovanej veľkosti signálu pre ďalší stupeň zosilňovača, ktorý môže byť ako korekčná časť alebo samotný koncový zosilňovač. Vo väčšine prípadov je vstupné napätie predzosilňovača normované podľa zdroja signálu. Ako prvý člen audio výkonového zosilňovača má predzosilňovač veľké zosilnenie, pretože zosilňuje najmenšiu úroveň signálu a je citlivý na vlastný šum, ktorý ako on sám zosilňujú aj ďalšie stupne. Jeho vstupná impedancia je niekoľkonásobne vyššia, aby sa výstupná impedancia v obvode príliš neuplatňovala [1].

Korekčná časť zosilňovača, ktorá má za úlohu vhodným spôsobom upravovať frekvenčnú charakteristiku môže byť tvorená jednoduchším spôsobom spojením s predzosilňovačom ako korekčný predzosilňovač alebo zložitejšie ako equalizér [1].

Korekčný predzosilňovač umožňuje nastavenie ovládacích prvkov zosilňovača, ktorými môže byť hlasitosť, hĺbky, výšky, alebo aj stereofónne vyváženie, teda

balance. Zo strany konštrukčnej môže byť predzosilňovač súčasťou celého zosilňovača alebo môže byť umiestnený v zvlášťnej skrinke kedy sa jedná o drahšie riešenie avšak umožňujúce stavebnicovú koncepciu zosilňovača [1].

Equalizér je drahšia a komfortnejšia verzia korekčného predzosilňovača. Jeho konštrukcia môže byť riešená pre obidva stereofónne kanály oddelene alebo v rámci lacnejšieho prevedenia spoločne. Ako ovládacie prvky bývajú zvyčajne použité potenciometre ktoré ovplyvňujú kmitočtový priebeh na určitom kmitočte. Z toho vyplýva, že čím je počet potenciometrov vyšší, tým viac kmitočtových pásiem je možné potlačiť alebo zdôrazniť. Vzájomná vzdialenosť daných pásiem udáva typ equalizéru. V prípade jednej oktávy sa jedná o oktávový equalizér, v konečnom dôsledku počet pásiem, ktoré equalizér upravuje udáva, o koľko pásmový equalizér sa jedná. Potenciometre používané v konkrétnych zapojeniach môžu byť otočné alebo ťahové ktorých nastavenie je prehľadnejšie a sú označované ako grafické. Equalizérom je možné jednak korigovať nedostatky frekvenčného rozsahu prehrávaného signálu, prípadne zdôrazniť alebo potlačiť niektoré z nástrojov orchestra alebo frekvenčne upraviť nedostatky počúvaného priestoru [1].

Existuje ešte iné zvláštne druhy korekcie ktoré sú v dnešnej dobe už využívané v menšej miere. Jedným z nich je aj korekcia RIAA. Úlohou predzosilňovača s charakteristikou RIAA je korigovať signál pochádzajúci z gramofónovej prenosky. Kvôli dosiahnutiu väčšieho odstupu užitočného signálu od rušivých vplyvov a rovnako pre dosiahnutie väčšej dynamiky záznamu je signál upravený tým spôsobom, že basy sú potlačené a výšky zdôraznené. Americká norma určujúca parametre tejto úpravy signálu je nazývaná skratkou RIAA. Princíp spočíva v tom, že signál z prenosky je privádzaný do už zmieneného korekčného predzosilňovača, ktorého úlohou je priviesť ho opäť do pôvodného stavu, v ktorom bol pred záznamom [1].

Ďalší zvláštny druh korekčného predzosilňovača je korekčný predzosilňovač pre magnetodynamickú prenosku, ktorý obsahuje dve sérioparalelné RC kombinácie v ktorých prvá odpovedá korekcií frekvenčného rozsahu 50Hz až 500 Hz a druhá potom 2120 HZ až 20 kHz. Na výstupe predzosilňovača sa nachádza emitorový sledovač s jednotkovým zosilnením a s možnosťou nastavenia výstupného napätia. Mimo toho nastavuje výstupnú impedanciu na relatívne nízku hodnotu [1].

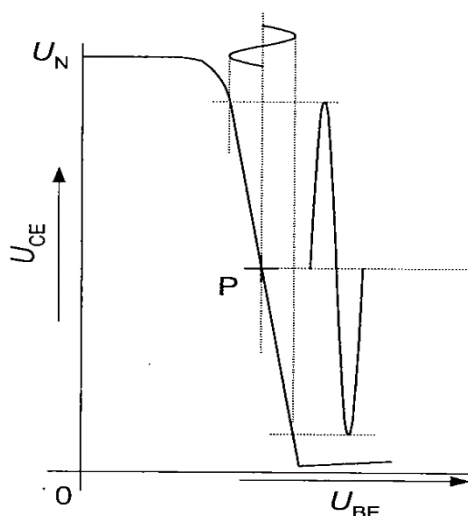
### 1.3.2 Koncové (výkonové) zosilňovače

Výkonový zosilňovač je výkonový menič ktorého úlohou je dodanie potrebného výkonu do určitej záťaže, teda vybudenie membrány reproduktoru na potrebný elektrický výkon, ktorý sa následne premení na akustický výkon. Koncový zosilňovač sa môže nachádzať v diskretnom, integrovanom alebo hybridnom prevedení. Použité napájanie môže byť symetrické alebo nesymetrické. Sú prevádzkované v rôznych triedach ktoré definujú buď základný princíp činnosti celého zosilňovača alebo pracovnú charakteristiku koncového stupňa [3].

#### 1.3.2.1 Najpoužívanejšie pracovné triedy výkonových zosilňovačov

- **Trieda A**

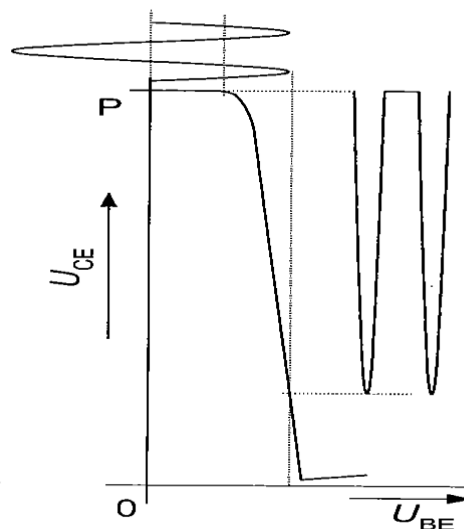
Zosilňovače pracujúce v triede A sa vyznačujú tým, že ich pracovný bod je umiestnený v strede lineárnej časti prevodovej charakteristiky zosilňovacieho prvku, čo je docielené veľkým kludovým prúdom. To znamená, že výkonové súčiastky v jednočinnom zapojení sú stále v aktívnom stave. Umiestnenie pracovného bodu má za následok minimálne skreslenie, avšak prináša zníženú účinnosť zosilňovača, ktorej maximálna hodnota u jednočinného zapojenia je len 25%. Ostatný dodávaný príkon sa premieňa na teplo, ktoré musí byť odvádzané do okolia, teda je potrebné chladenie výkonových súčiastok, ktoré je náročné. Z pravidla je trieda A používaná do maximálneho výstupného výkonu 20W [3].



Obr. 3: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača triedy A. Prevzaté z [3]

- **Trieda B**

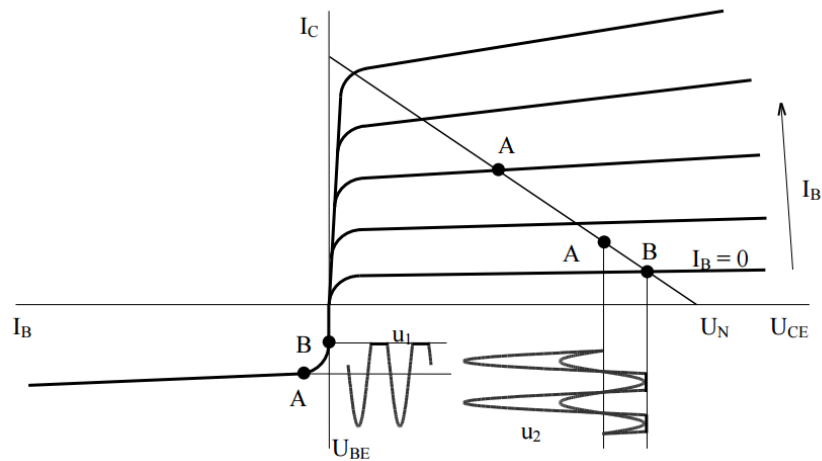
Pracovná trieda B pracuje v dvojčinnom zapojení, kedy každý tranzistor spracováva jednu polovicu budiaceho signálu a do výkonových tranzistorov nie je privedené žiadne predpätie. To znamená, že súčiastky prvej časti koncového zosilňovača sú pri kladnej polvlne aktívne, pri zápornej sú aktívne súčiastky druhej časti. Inak sú nevodivé, teda obe časti výkonového zosilňovača sa striedajú v činnosti v závislosti na polarite. Pracujú v nelineárnej oblasti charakteristiky. Vysokú účinnosť až 75% má za následok aktívnosť vždy len jedného z tranzistorov. Nevýhodou triedy B je veľké harmonické skreslenie v oblasti malých signálov [3].



Obr. 4: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača triedy B. Prevzaté z [3]

- **Trieda AB**

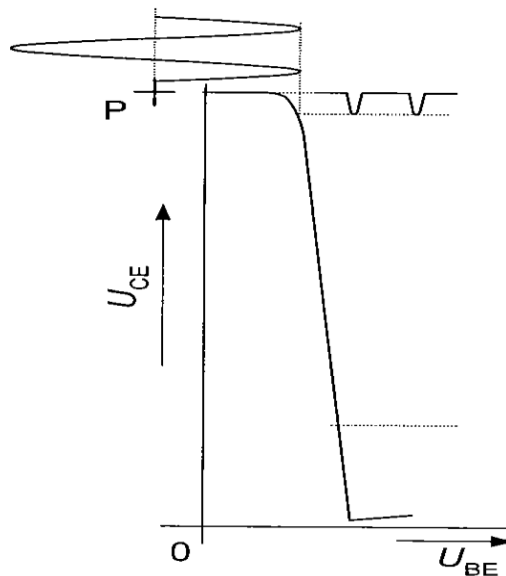
Zosilňovače triedy AB sa z hľadiska zapojenia koncového zosilňovača blížia k triede B, ale sú spojením a teda pracujú v triede A aj v triede B. Do výkonových tranzistorov je zavedený malý kľudový prúd, ktorý nepatrne zvyšuje spotrebu a znižuje účinnosť a nastavuje pracovný bod do kolena prevodovej charakteristiky. Pri takto stavenom pracovnom bode sa účinnosť pohybuje okolo 70% [3].



Obr. 5: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača v triede AB. Prevzaté z [3].

- **Trieda C**

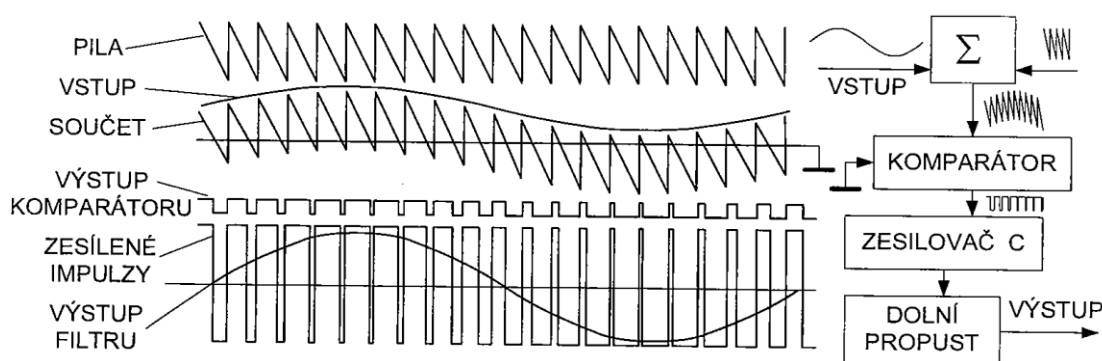
Zosilňovače triedy C sa vyznačujú tým, že majú nulový kľudový prúd a vďaka nastavenému predpätiu je pracovný bod umiestnený až za oblasťou zániku kolektorového prúdu, čím je ovplyvnený uhol otvorenia tranzistora. To má za následok fakt, že časť signálu sa oreže a zvyšok sa zosilní. Z toho vyplýva väčšie skreslenie ako v triede B a preto je trieda C zaradená medzi nelineárne zosilňovače. Ich účinnosť sa pohybuje medzi 85% až 90%. V nízkofrekvenčnej technike sú nepoužiteľné, uplatňujú sa však vo vysokofrekvenčnej technike v zapojeniach vo vysielateľoch [3].



Obr. 6: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača v triede C. Prevzaté z [3]

- **Trieda D**

Zosilňovače triedy D pracujú na princípe spracovávanie vstupného signálu pomocou impulznej šírkovej modulácie PWM, ktorý je ďalej zosilňovaný zosilňovačom v triede C. Ich výstupný signál je privádzaný na dolnú prepust' ktorá prevedie modulovaný signál späť na spojitý nízkofrekvenčný signál. Na základe číslicového spracovania signálu sú označované ako digitálne a nepatria do kategórie lineárnych zosilňovačov. Ich účinnosť sa pohybuje v rozmedzí od 80% do 90% čo je ich hlavnou výhodou, rovnako ako aj malé tepelné straty, výrobné náklady a úspora miesta. V porovnaní s triedou A alebo AB je nevýhodou väčšie skreslenie a prienik vysokofrekvenčného signálu z napájacieho zdroja zosilňovača [3].



Obr. 7: Princíp zosilňovača s impulznej šírkovou moduláciou (Trieda D). Prevzaté z [3]

### 1.3.2.2 Špeciálne triedy zosilňovačov

Ďalšie skôr už kuriózne riešenia zosilňovačov obmedzujúce výkonové straty zosilňovača sú triedy G a H. Trieda G oddelene spracováva silné a slabé signály takže vo väčšine prípadov si vystačí so slabším zdrojom. Výkonový zdroj je uspôsobený len na znášanie krátkodobých špičiek signálu. Zosilňovače pracujúce v triede H automaticky riadia napájací zdroj, teda veľkosti jeho napätí, v závislosti na veľkosti požadovaného vstupného napätia [3].

Existujú aj iné špeciálne zosilňovače. Zosilňovač pracujúci v triede AA (A+) je charakteristický vstupným zosilňovačom pracujúcim v triede A, pričom je napájaný zo zdroja malého napätia, ktoré je plávajúce a je posúvané zosilňovačom pracujúcim v triede B [3].

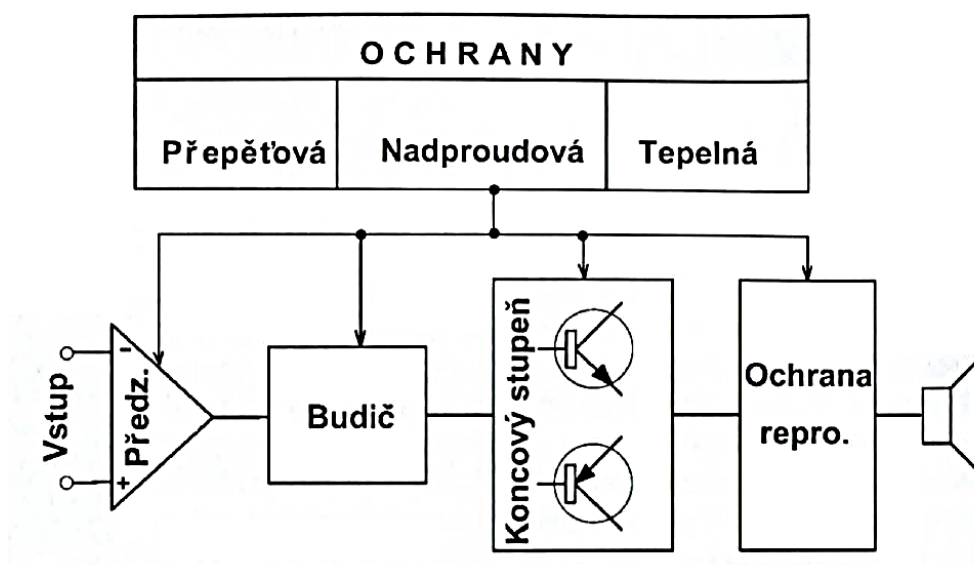


Zosilňovače triedy S sa líšia od triedy D tým, že nepotrebujú na výstupe LC filter ako dolnú priepust na potlačenie produktov spínania. Ďalšie zosilňovače pracujúce v triede T, ktorým označenie dala firma Tripath sú takmer rovnaké ako tie pracujúce v triede D. Pracujú na podobnom princípe ale používajú lepší algoritmus riadenia [4].

## 1.4 Integrované výkonové zosilňovače

Prvé náznaky výroby integrovaných operačných zosilňovačov siahajú do doby pred 40. rokmi. Do tejto doby boli používané výhradne konštrukcie s diskretnými súčiastkami. Ich vývoj a neustále zvyšovanie kvality viedli k zlepšovaniu technologických parametrov, k zmenšovaniu ich rozmerov a tým pádom aj k masovému montovaniu do prístrojov spotrebnej elektroniky. Konštruktéri sa vo veľkej časti prípadov uberajú smerom pomeru rozmerov, spoľahlivosti, zníženiu celkového počtu elektronických súčiastok a jednoduchej montáže, preto sú v dnešnej dobe relatívne často využívané [2].

Hranica výkonov jednotlivých zosilňovačov sa neustále posúva smerom nahor, v dnešnej dobe dosahuje hodnoty až 20-300W kedy sa dá výkon stále zvýšiť zapojením do mostíka. Avšak z hľadiska skreslenia alebo prípadného frekvenčného rozsahu zosilňovača nastáva problém. Najväčšie kvalitatívne parametre sa dajú dosiahnuť len v zapojení spolu s diskretnými súčiastkami. Táto trieda je označovaná ako High-End [2].



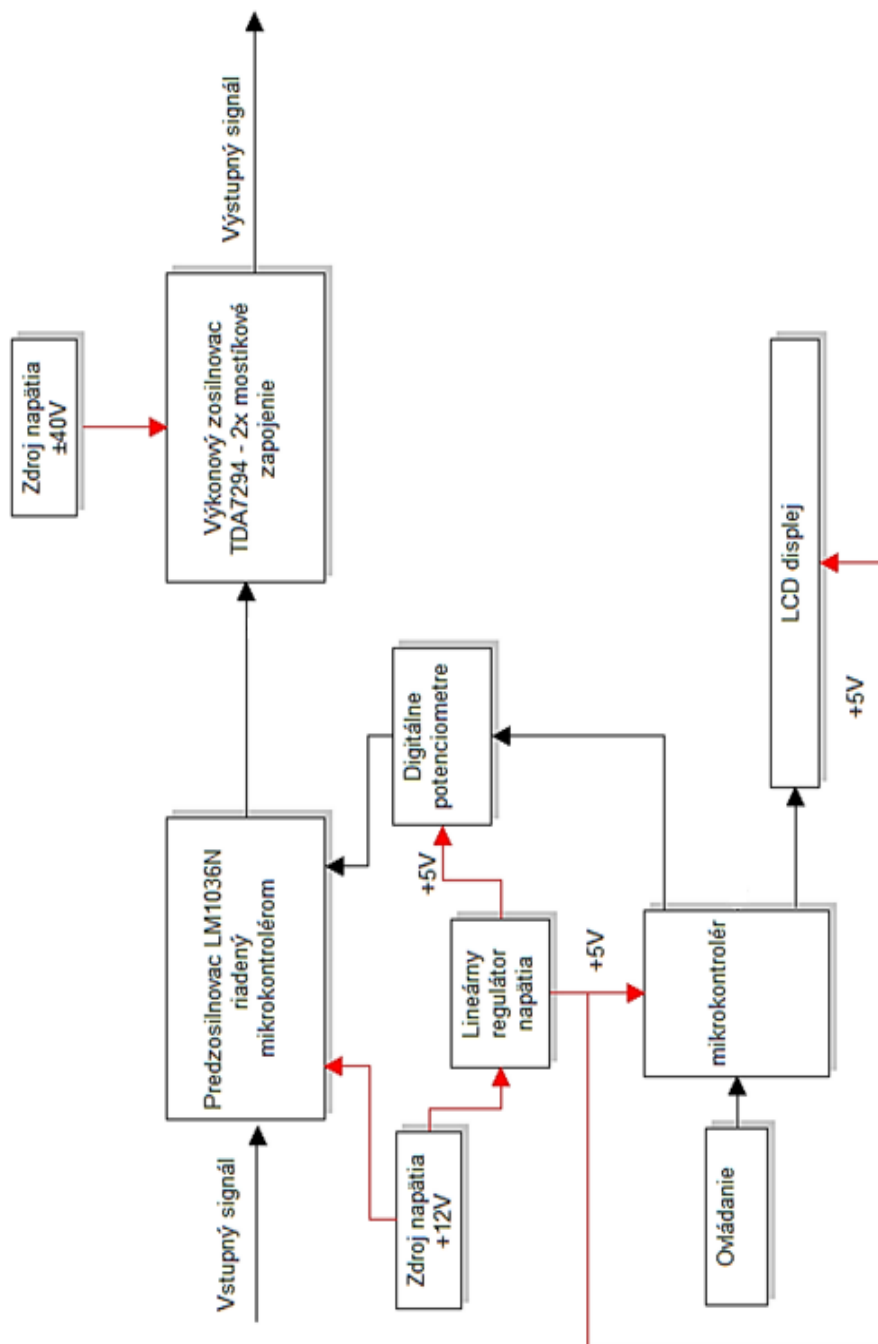
Obr. 8: Bloková schéma integrovaného zosilňovača. Prevzaté z [2]

V puzdre integrovaného zosilňovača sa môže nachádzať veľa blokov vykonávajúcich jednotlivé funkcie. Z pravidla sa za vstupnými svorkami nachádza predzosilňovač ktorého výstup je pripojený na budiaci stupeň za ktorým nasleduje koncový stupeň. Celý obvod môže mať niekoľko ochrán. Vo väčšine prípadov integrovaný zosilňovač automaticky obsahuje ochranu proti teplotnému preťaženiu, ochranu proti prepätiu alebo skratu ako aj napájacie či stabilizačné obvody niektorých zosilňovacích stupňov (obr. 8) [2].

## 2 NÁVRH STEREO AUDIO ZOSILŇOVAČA

### 2.1 Návrh audio zosilňovača – bloková schéma

Bloková schéma navrhnutého audio výkonového nízkofrekvenčného zosilňovača vypovedá o spôsobe jeho návrhu a o funkciách jednotlivých blokov. V ďalších kapitolách budú tieto funkcie podrobne popísané.



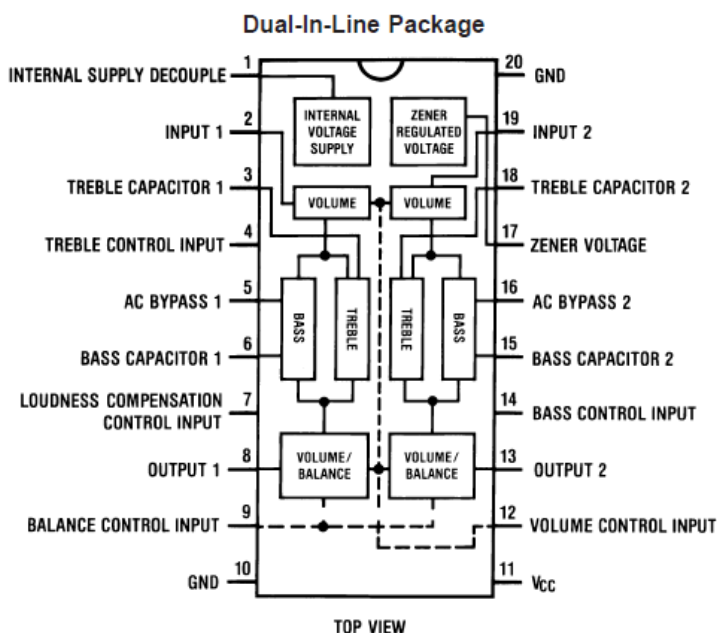
Obr. 9: Bloková schéma audio výkonového zosilňovača (vlastné spracovanie)

## 2.2 Návrh korekčného predzosilňovača

Korekčný predzosilňovač plní úlohu nastavovania korekcií predzosilňovača, teda zmenu jeho ovládacích prvkov. Jeho vyhotovenie býva najčastejšie prevedené pomocou diskretných súčiastok alebo pomocou integrovaných obvodov. V dnešnej dobe korekčné predzosilňovače s použitím integrovaných obvodov už dosahujú približne rovnakú kvalitu výstupného signálu ako korekčné predzosilňovače zložené z diskretných súčiastok. A teda výhodou v zapojení s integrovanými obvodmi je jednoduchosť celkového zapojenia predzosilňovača a jeho ovládania. Z tohoto dôvodu bol pre konkrétne riešenie zvolený integrovaný obvod LM1036N od spoločnosti Texas Instruments [6].

### 2.2.1 Popis obvodu LM1036N

Integrovaný obvod LM1036N je stereofónny predzosilňovač napájaný jednosmerným nesymetrickým napätím v rozsahu 9 až 16V, vhodný pre aplikáciu v autorádiách, televíziách alebo všeobecne v audio systémoch. Obvod obsahuje štyri riadiace vstupy ktorých funkciou je riadenie hlasitosti, basov, výšok a vyváženia medzi ľavým a pravým kanálom [6].



Obr. 10: Vnútna bloková schéma integrovaného obvodu LM1036N. Prevzaté z [6]

Vstupy integrovaného obvodu zabezpečujúce korekciu štyroch základných funkcií, sú ovládané pomocou štyroch potenciometrov regulujúcich napätie privedené na jednotlivé riadiace piny. Zdrojom napätia môže byť zenerové regulované napätie pochádzajúce priamo z vývodu 17 obvodu LM1036N, ktorého výrobcom udávaná veľkosť napätia je 5,4V. Druhou možnosťou je externý zdroj napätia s minimálnym napätím 5V [6].

Žiadaná zvuková charakteristika jednotlivých korekčných funkcií sa dosiahne pripojením kondenzátorov definujúcich ich vlastnosti k jednotlivým pinom [6].

### 2.2.2 Základné parametre obvodu LM1036N

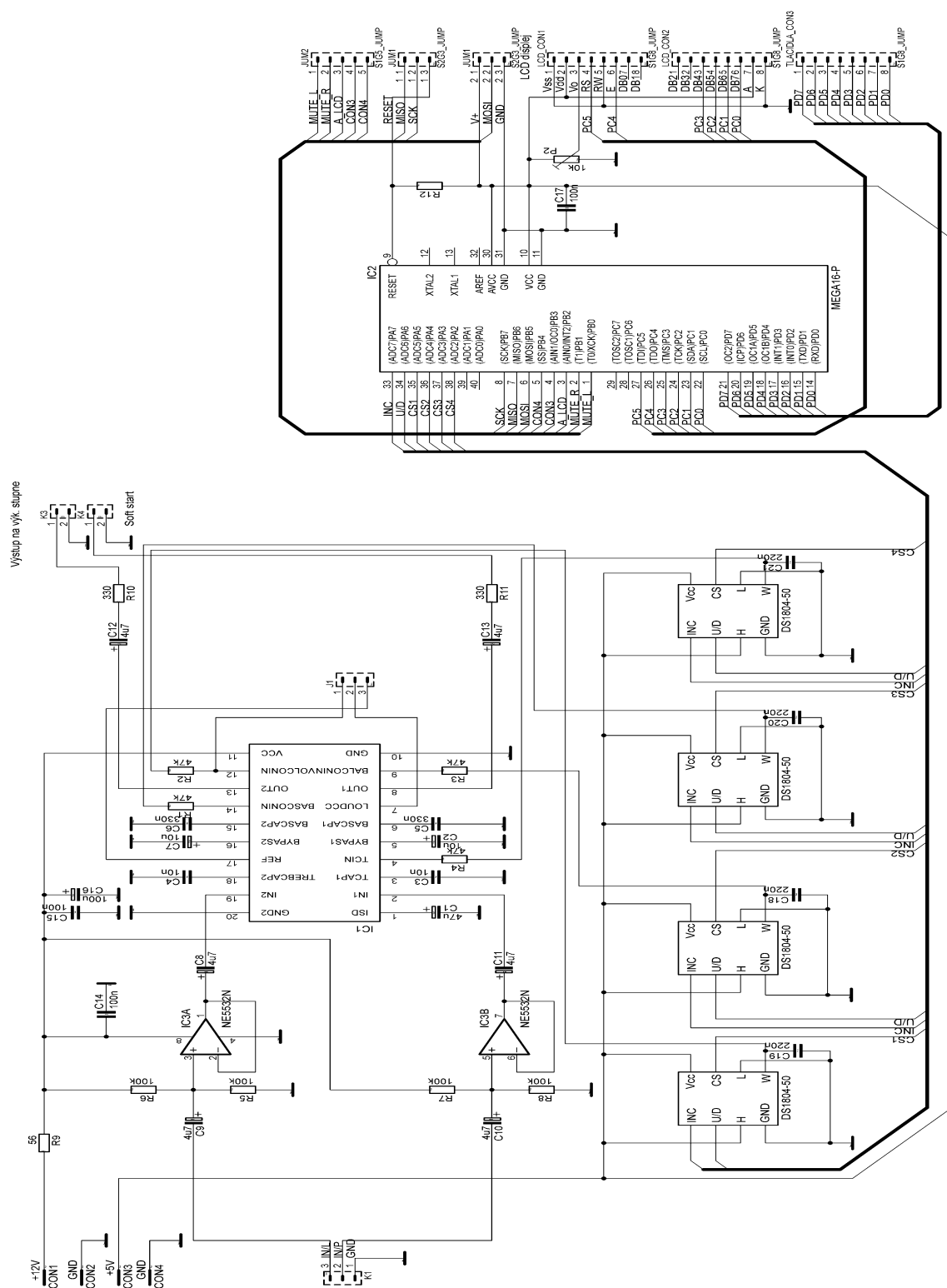
Tab. 1: Základné parametre obvodu LM1036N. Prevzaté z [6]

$$V_{CC}=12V, T_A=25^{\circ}C$$

Parameter	Podmienka	Min	Typ	Max	Jednotka
Napájacie napätie		9		16	V
Prúdový odber			35	45	mA
Maximálne vstupné napätie	f=1kHz, $U_{CC}=9V$		0,8		V
	f=1kHz, $U_{CC}=12V$	0,8	1		V
Maximálne vstupné napätie	f=1kHz, Gain= -10dB	1,3	1,6		V
Vstupná impedancia	f=1kHz	20	30		k $\Omega$
Výstupná impedancia	f=1kHz		20		$\Omega$
Maximálne zosilnenie	f=1kHz	-2	0	2	dB
Rozsah regulácie hlasitosti	f=1kHz	70	75		dB
Rozsah korekcie hĺbok	f=40Hz, $C_b=0,39\mu F$	12	15	18	dB
	$U(\text{Pin } 14) = U(\text{Pin } 17)$	-12	-15	-18	dB
	$U(\text{Pin } 14) = 0V$				
Rozsah korekcie výšok	f=16kHz, $C_b=0,01\mu F$	12	15	18	dB
	$U(\text{Pin } 4) = U(\text{Pin } 17)$	-12	-15	-18	dB
	$U(\text{Pin } 4) = 0V$				
Celkové harmonické skreslenie	f=1kHz, $U_{in}=0,3V$		0,06	0,3	%
	Gain = 0dB		0,03		%
	Gain = -30dB				
Odstup signál/šum		75	80		dB

## 2.2.3 Návrh zapojenia predzosilňovača

### 2.2.3.1 Schéma zapojenia



Obr. 11: Schéma zapojenia predzosilňovača s mikrokontrolérom (vlastné spracovanie)

### 2.2.3.2 Popis zapojenia

Hlavnou časťou zapojenia je integrovaný korekčný obvod LM1036N. Ten je napájaný nesymetrickým napätím +12V. I napriek existencii vnútorného referenčného zdroja napätia integrovaného obvodu, na riadenie obvodu bolo zvolené napätie z externého zdroja napätia +5V. To je privádzané na digitálne potenciometre ako referenčné aj ako napájacie napätie. Referenčné napätie OZ je využité na riadenie fyziologickej regulácie takzvanej loudness, ktorá je aktivovaná spojením pinov 7 a 12 [6].

Úpravu frekvenčnej charakteristiky na stredných kmitočtoch zaručujú dvojice kondenzátorov pripojené na jednotlivé piny. Na korekciu basov sú použité kondenzátory C5 a C6 pripojené na piny 6 a 15. Ich hodnota 390nF bola zvolená podľa katalógového listu. Korekciu výšok na daných kmitočtoch zaručuje dvojica kondenzátorov C3 a C4 ktorých hodnota 10nF bola opäť zvolená podľa katalógového listu [6].

Na vstupe integrovaného obvodu je pripojený operačný zosilňovač NE5532N ktorý má funkciu emitorového sledovača. V tomto zapojení zvyšuje vstupný odpor obvodu a vyznačuje sa malým šumom. Neinvertujúci vstup operačného zosilňovača je pripojený na odporový delič ktorým bolo na daný vstup privedené predpätie nutné kvôli správnej funkčnosti v zapojení s nesymetrickým napájaním. Dvojice kondenzátorov C9, C8 a C10, C11 na vstupe zabezpečujú oddelenie úrovni jednosmerného napätia [9].

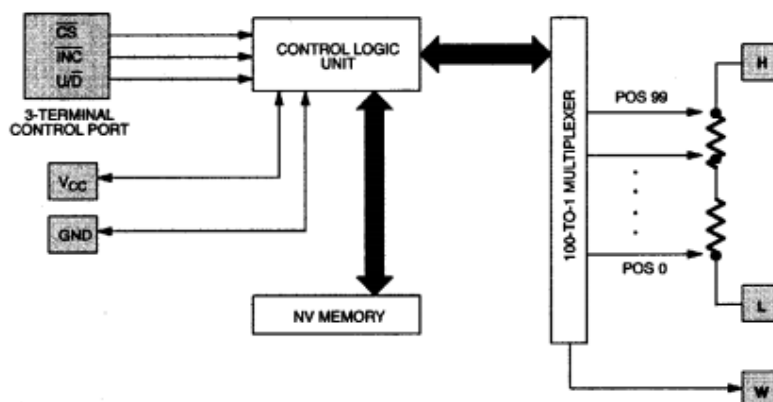
Aktívne riadenie hlasitosti, hĺbok, výšok a balance je tvorené štvoricou digitálnych potenciometrov DS1804-50. K ich bežcom sú pripojené kondenzátory veľkosti 220nF a spolu tvoria jednoduché RC články slúžiace na odstránenie rušivých napätí [7].

Ovládanie digitálnych potenciometrov zabezpečuje mikrokontrolér ATmega16. Port D je cez vnútorné pull-up rezistory pripojený na konektor ktorý je vodičmi prepojený s ovládacím panelom obsahujúcim sadu 8 spínačov spojených so zemou, slúžiacich na riadenie jednotlivých korekcií predzosilňovača. Piny PA0 až PA5 portu A ovládajú správnu funkciu jednotlivých digitálnych potenciometrov. Port C je pripojený na konektor zobrazovacej jednotky, teda LCD displeja. Port B je rozdelený na niekoľko častí. Piny PB7 až PB5 sú spolu s pinom resetu, napätím +5V a GND

spojené s konektorom ISP slúžiacim na programovanie mikrokontroléra. Ostatné piny sú vyvedené na samostatný konektor pričom PB4 a PB3 sú využité na funkciu oneskoreného pripojenia reproduktorov a teda aj zároveň ako funkcia MUTE / ST-BY. Pin PB2 pripojený na anódu LCD displeja slúži na jeho rozsvetovanie a zhasínanie pri dlhšej nečinnosti mikrokontroléra. Zvyšné piny portu B sú nachystané pre prípadné budúce aplikácie. Mikrokontrolér, digitálne potenciometre a rovnako aj LCD displej sú napájané jednosmerným nesymetrickým napätím +5V. Medzi pinom napájacieho napätia a pinom zeme mikrokontroléra je pripojený kondenzátor C17 s hodnotou 100nF kvôli odrušeniu nežiadúcich napätí [14].

### 2.2.3.3 Funkcia digitálnych potenciometrov DS1804-50

Digitálne potenciometre DS1804 sú napájané nesymetrickým napätím v rozmedzí 2,7V do 5,5V. Sú riadené pomocou 3 logických vstupov, ktoré môžu byť nastavované aj manuálne bez použitia mikrokontroléru, dokonca ich aktuálna poloha bežca môže byť zapísaná do pamäte EEPROM [7].



Obr. 12: Bloková schéma digitálneho potenciometra DS1804. Prevzaté z [7]

Potenciometre DS1804 dokážu meniť svoj odpor v rozmedzí udávaným výrobcom a to  $0\Omega$  až  $50k\Omega$ . Výrobca k nim taktiež udáva toleranciu  $\pm 20\%$ , to však nebude mať zásadný vplyv na chod navrhovaného predzosilňovača. Digitálne potenciometre sú ovládané pomocou mikrokontroléra ATmega16. Každý z nich má 3 logické vstupy INT, U/D a CS. Logická funkcia CS (Chip Select) po privedení logickej nuly aktivuje vybraný potenciometer. Funkcia U/D určuje inkrementáciu

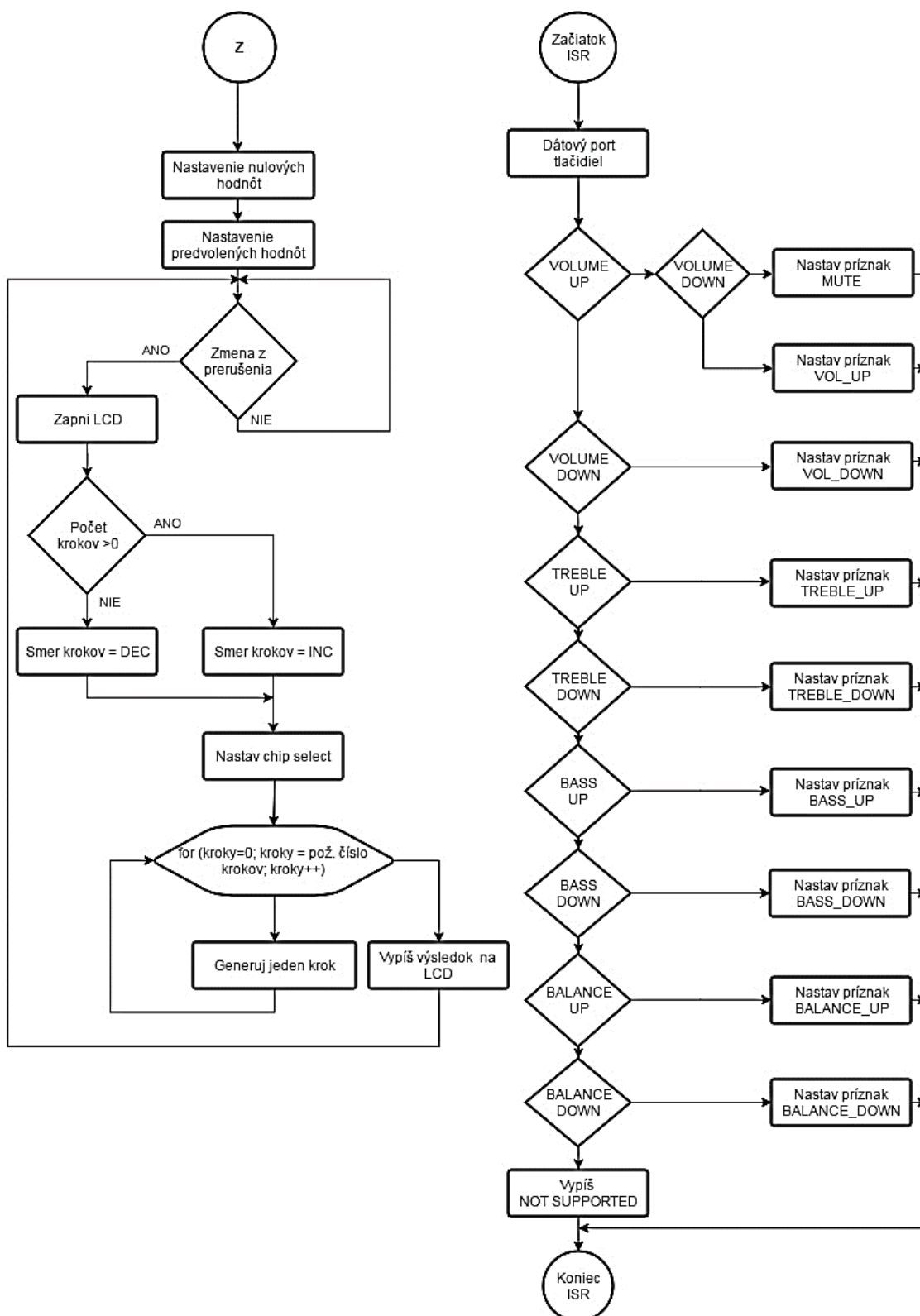


alebo dekrementáciu odporu digitálneho potenciometra. Privedením logickej jednotky z mikrokontroléra na vstup U/D sa potenciometer prepne do stavu pripraveného zvyšovať jeho odpor. V opačnom prípade sa odpor znižuje. Privádzaním impulzov na logický vstup INC s minimálnym odstupom 200ns sa v sto krokoch nastavuje hodnota potenciometra. Napätový vstup H je pripojený na referenčné napätie, výstup L zase ku svorke GND. Výstup z potenciometra, takzvaný bežec (Wiper) veľkosťou svojho napätia riadi vybranú funkciu predzosilňovača [7].

## **2.3 Programové vybavenie mikrokontroléra ATMEGA 16**

Po spustení mikrokontroléra, teda po privedení napájacieho napätia na jeho napájacie piny sa spustí funkcia `init` ktorá vykoná jeho inicializáciu. To znamená, že sa nastaví jednotlivé porty ako vstupné alebo výstupné, inicializuje sa displej a zapne sa funkcia `MUTE ON` ktorá v tomto prípade slúži ako oneskorené pripojenie reproduktorov. Následne sa nakonfigurujú timre (časovače) teda sa nastaví hodnoty jednotlivých preddeličiek, povolia sa interrupty (prerušenia) od timerov a nastaví sa do nich požadovaná počiatočná hodnota. V ďalšom kroku nasleduje inicializácia potenciometrov ktoré sú funkciou `pot_zero_scale` nastavené na nulovú hodnotu a následne funkciou `pot_init` nastavené na požadovanú začiatočnú hodnotu. Konkrétne potenciometer vykonávaný funkciou zmeny volume na 40% svojho rozsahu a ostatné potenciometre na polovicu teda na 50 krokov. Zároveň je na LCD displej vypísaný počiatočný text inicializácie a nakoniec sa vypne funkcia `MUTE OFF` čím sa spustia výkonové zosilňovače pre oba kanály. Po inicializácii sa mikrokontrolér uvedie do nekonečného cyklu v ktorom stále spúšťa funkciu `Pot_RunTask` ktorej implementácia vykonáva hlavnú funkčnosť jadra programu.

### 2.3.1 Vývojový diagram programu pre obsluhu potenciometrov



Obr. 13: Vývojový diagram programu pre obsluhu potenciometrov (vlastné spracovanie)

Po inicializácii sa spustí TIMER0 v ktorom podľa nastavenej preddeličky a hodnoty TCNT0 registru každých 20ms nastáva INTERRUPT. V tomto prerušení programu sa kontroluje register portu D a jeho hodnota sa porovnáva s preddefinovanými konštantami na základe čoho je vyhodnocované ktoré tlačidlo bolo aktívne. Na základe výsledku porovnávania sa nastaví v štruktúre potentiometer\_t príznak. Tento príznak určuje funkcií Pot\_RunTask konkrétny potenciometer, ktorého hodnota sa má meniť. Zmena hodnoty sa vykonáva pomocou funkcie Callback ktorá vyhodnocuje či má byť potenciometer inkrementovaný, prípadne dekrementovaný a o koľko krokov sa má jeho hodnota zmeniť. Následne sa aktivuje CSPin požadovaného potenciometra a vygeneruje sa potrebný počet krokov.

### 2.3.2 Hlavné dátové štruktúry programu

- **Štruktúra pinData**

Štruktúra pinData\_t zaručuje spravovanie pinov mikrokontroléru, ku ktorým je potrebný osobitný prístup. Skladá sa z dvoch dôležitých atribútov:

1. *atribút iDataReg*

– funguje ako ukazateľ na dátový register portu príslušného pinu,

2. *atribút iPinNum*

- funguje ako ukazateľ na konkrétny pin.

```
typedef struct pinData_t
{
    volatile uint8_t *iDataReg;           /**< Data register */
    uint_t           iPinNum;             /**< Number of pin */
} pinData_t;
```

- **Štruktúra potenciometrov**

Štruktúra potentiometer\_t vytvára softwarový model potenciometru DS1804-50, ktorý umožňuje jeho riadenie. Skladá sa zo 7 atribútov:

**1. atribút iCSPin**

– nastavuje CS teda vstup digitálneho potenciometra zaručujúci jeho aktiváciu,

**2. atribút iIncPin**

– nastavuje na potenciometri pulzy, ktoré menia jeho hodnotu,

**3. atribút iIncDirPin**

- nastavuje na potenciometri parameter inkrementu / dekrementu,

**4. atribút**

- príznak vypovedajúci o stlačení tlačidla,

**5. atribút**

- počet krokov, ktoré má potenciometer aktuálne,

**6. atribút**

- požadovaný počet krokov zmeny potenciometra,

**7. atribút**

- obslužná funkcia, ktorá je volaná pri zmene v prerušení.

```
struct potentiometer_t
{
    pinData_t    *iCSPin;           /**< Chip select pin */
    pinData_t    *iIncPin;          /**< Increment pin */
    pinData_t    *iIncDirPin;       /**< Direction pin */
    bool iIsUpdate;                 /**< Update request */
    uint8_t      iCuurentSteps;     /**< Number of current steps */
    int8_t       iDesiredSteps;     /**< Desired steps */
    potCallback  iCallback;         /**< Callback function */
};
```

### 2.3.3 Zobrazovacia jednotka a zobrazovanie na displej

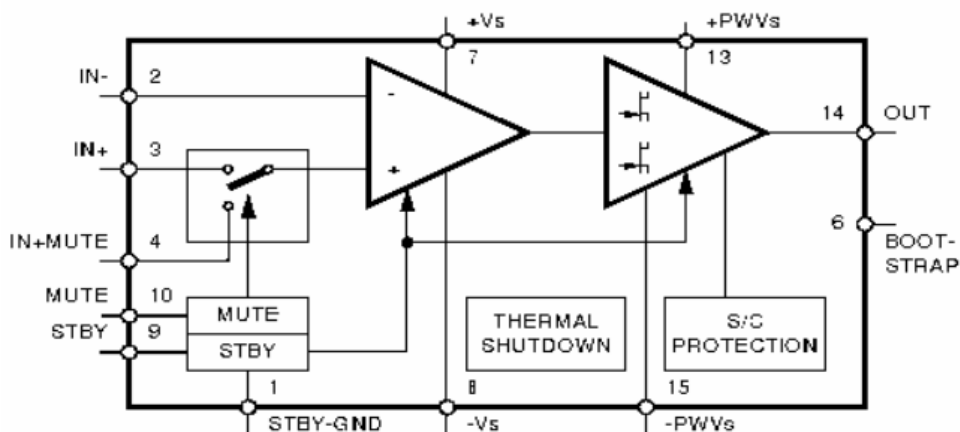
Jednou z hlavných periférií mikrokontroléru je aj zobrazovacia jednotka. Pre tento účel bol zvolený dvojriadkový 16 znakový alfanumerický LCD displej s radičom HD44780 komunikujúcim s mikrokontrolérom pomocou 4 bitov. Pre správnu funkciu LCD displeja mikrokontrolér využíva knižnicu `lcd.h` ktorá obsahuje inicializáciu displeja a funkcie na zobrazenie znakov. Z hľadiska princípu je v obslužnej funkcii potenciometra pomocou funkcie `snprintf` poskladaný reťazec znakov ktorý je následne funkciou `lcd_puts` odosielaný na displej.

### 2.4 Návrh výkonového zosilňovača.

Stereo audio výkonový zosilňovač má byť navrhnutý s výstupným výkonom 2x100W. Na túto realizáciu bol zvolený DMOS audio zosilňovač TDA7294 s hodnotou výstupného výkonu 100W.

#### 2.4.1 Popis a vnútorná štruktúra obvodu TDA 7294

Obvod TDA7294 je monolitický integrovaný obvod v puzdre Multiwatt15 pracujúci v triede AB, ktorý spĺňa normu Hi-Fi. Je schopný dodávať maximálny výkon a veľký prúd do 4Ω aj 8Ω záťaže. Má veľký rozsah napájacieho napätia od  $\pm 10V$  do  $\pm 40V$ . Do výkonu 70W je hodnota skreslenia T.H.D nižšia než jedno percento na celom frekvenčnom rozsahu [8].



Obr. 14: Vnútorné blokové zapojenie zosilňovača TDA7294. Prevzaté z [8]

Jeho súčasťou sú aj vstavané funkcie mute a stand-by, teda funkcie na stlmenie zvuku až o 80dB alebo oneskorené pripojenie reproduktorov. Obvod obsahuje aj ochranné prvky ako tepelnú poistku ktorá dokáže obvod stlmiť, prípadne úplne odpojiť od napájacieho napätia alebo ochranu proti skratu. Jeho puzdro sa vyrába v horizontálnom aj vertikálnom prevedení [8].

## 2.4.2 Základné parametre obvodu

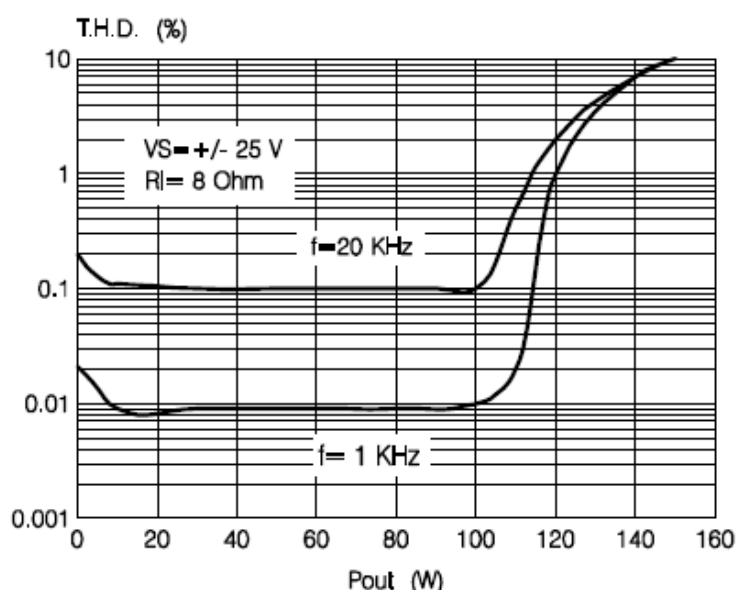
Tab. 2: Základné parametre obvodu TDA7294. Prevzaté z [8]

$V_{CC}=\pm 35V$ ,  $R_z=8\Omega$ ,  $G_v=30dB$ ,  $R_g=50\Omega$ ,  $T=25^\circ C$ ,  $f=1kHz$  ak nie je stanovené inak

Parameter	Minimálna hodnota	Typická hodnota	Maximálna hodnota	Jednotka
Rozsah napájacieho napätia	$\pm 10$		$\pm 40$	V
Kľudový prúd	20	30		mA
Stredná hodnota trvalého výstupného výkonu pri THD=0,5%				
$U_{CC} = \pm 35V$ , $R_L = 8\Omega$	60	70		W
$U_{CC} = \pm 31V$ , $R_L = 6\Omega$	60	70		W
$U_{CC} = \pm 27V$ , $R_L = 4\Omega$	60	70		W
Celkové harmonické skreslenie $P = 5W$ , $f = 1kHz$ $P = 0,1$ až $50W$ , $f = 20Hz$ až $20kHz$		0,01	0,1	% %
Napät'ové zosilnenie so spätnou väzbou	20	30	40	dB
Vstupný šum $f = 20Hz$ až $20kHz$	2	5		$\mu V$
Frekvenčná odozva (-3dB) $P=1W$	20Hz až 20kHz			
Vstupná impedancia	100			k $\Omega$
<b>Stand-by / Mute funkcia</b>				
Stand-by on			1,5	V
Stand-by off	3,5			V
Stand-by útlm	70	90		dB
Mute on			1,5	V
Mute off	3,5			V
Mute útlm	60	80		dB

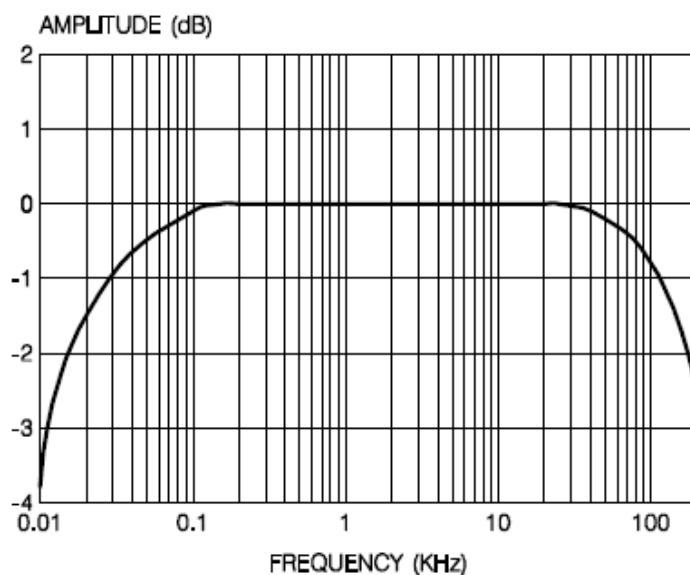
### 2.4.3 Návrh zapojenia výkonových stupňov

Zadaný maximálny výstupný výkon 100W na každý kanál zosilňovača je v zapojení s TDA7294 dosiahnutý so skreslením T.H.D až 10%. Pre naddimenzovanie výstupného výkonového parametra a dosiahnutie lepšieho skreslenia pri požadovanom výkone, bolo zvolené mostíkové zapojenie dvoch integrovaných obvodov TDA7294 pre jeden kanál. V tomto zapojení s výstupnou záťažou  $8\Omega$  má pri výstupnom výkone 100W zosilňovač skreslenie T.H.D len približne 0,1%, pri maximálnej zosilňovanej frekvencií 20kHz (Obr. 15). Avšak podmienkou je minimálna záťaž veľkosti  $8\Omega$  [8].



Obr. 15: Závislosť skreslenia T.H.D na výstupnom výkone. Prevzaté z [8]

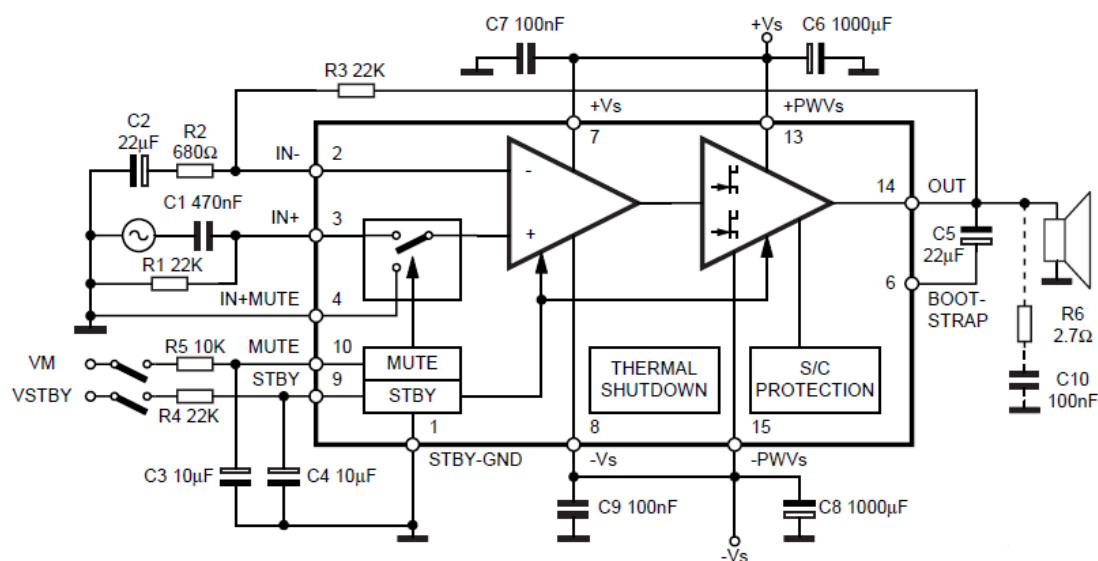
Maximálny výstupný výkon mostíkového zapojenia je dosiahnuteľný s pripojenou  $16\Omega$  záťažou a to až 170W pri skreslení 10%. Pri rovnakom skreslení v zapojení s  $8\Omega$  záťažou obvod dosahuje maximálne výkony približne 150W, čo vysoko prevyšuje nároky. Frekvenčná charakteristika zapojenia do mostíka je na obr. 16 [8].



Obr. 16: Frekvenčná charakteristika obvodu TDA7294. Prevzaté z [8]

#### 2.4.4 Schéma zapojenia obvodu a jeho popis

Schéma zapojenia obvodu bola navrhnutá podľa datasheet katalógu s originálnymi hodnotami súčiastok. V schéme sú pripojené aj funkcie stand-by a mute. Z dôvodu, že zapojenie časti výkonového zosilňovača je rovnaké pre všetky ostatné súčasti v mostíkovom zapojení, popis bude vysvetľovaný na schéme zapojenia pre jeden člen jedného výkonového stupňa (obr. 17) [8].



Obr. 17: Schéma zapojenia jedného výkonového stupňa. Prevzaté z [8]



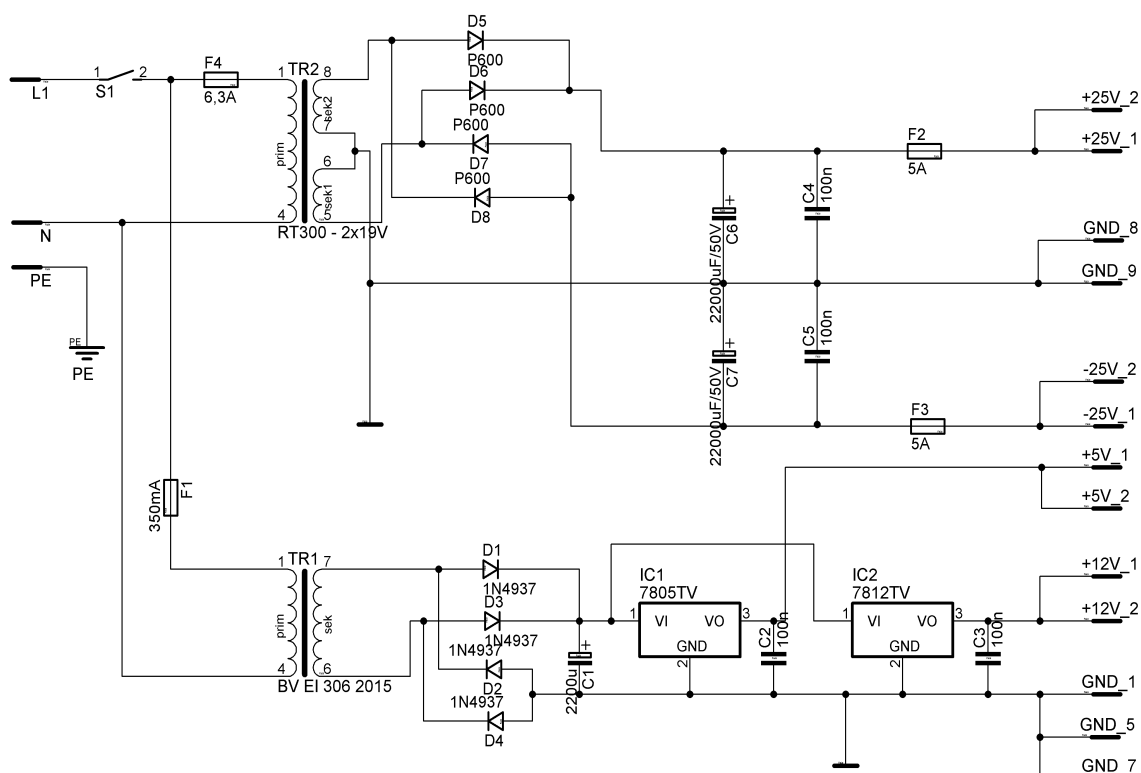
### **Popis zapojenia**

Vstupný nízkofrekvenčný signál je privedený na väzbový kondenzátor C1 a následne na vstup zosilňovača. Výstupný signál zosilňovača je privádzaný na výstupnú záťaž ale aj znova na jeho vstup ako spätná väzba tvorená z dvoch rezistorov R2, R3 a kondenzátoru C2. Funkciu zaistenia postupného nábehu zabezpečuje kombinácia rezistorov R4, R5 a kondenzátorov C3, C4. Zmenou hodnôt týchto rezistorov alebo kondenzátorov sa mení čas pripojenia daných funkcií, konkrétne zvyšovaním ich hodnoty sa doba nábehu zvyšuje, naopak znižovaním hodnoty sa doba znižuje. Funkcia slúži ako ochrana proti nepríjemnému zvukovému prejavu (lupnutiu) v reproduktorech pri spustení zariadenia. Pre správnu funkčnosť zapojenia sú k napájacím svorkám zosilňovača pripojené odrušovacie kondenzátory C7, C9 ktoré by mali byť na doske plošného spoja umiestnené čo najbližšie k napäťovým vstupom. Kondenzátory C6 a C8 slúžia ako filtračné [8].

### 3 NÁVRH NAPÁJACIEHO ZDROJA

Pre požadovanú celkovú koncepciu stereo audio zosilňovača bola navrhnutá napájacia jednotka pozostávajúca z dvoch častí. Nesymetrický stabilizovaný zdroj pre predzosilňovač a jeho riadiace obvody a symetrický zdroj pre výkonový zosilňovač (viď Obr.:18).

#### 3.1 Schéma zapojenia napájacieho zdroja



Obr. 18: Schéma zapojenia napájacieho zdroja (vlastné spracovanie)

#### 3.2 Popis schémy zdroja

Napájací zdroj je rozdelený na dve časti prepojené spoločnou zemou GND. Konkrétne na zdroj symetrického napätia  $\pm 25V$  a zdroj nesymetrického stabilizovaného napätia  $+12V$  a  $+5V$ . Sieťové napätie je cez spínač a poistky s nominálnou hodnotou prislúchajúcou každému zdroju privedené na jednotlivé transformátory TR2 a TR1. Sekundárne napätie transformátora TR2 je usmernené

štvoricou diód typu P600K zapojených do mostíka a následne vyfiltrované dvojicou elektrolytických kondenzátorov s vypočítanou nominálnou hodnotou 22000uF. K nim sú paralelne pripojené fóliové kondenzátory o veľkosti 100nF slúžiace na odrušenie prípadnej vysokofrekvenčnej zložky zdroja a teda vedú aj k zníženiu jeho vnútorného odporu. Takto vyhladené a vyfiltrované napätie je znova cez ochranné poistky privedené na výstupné konektory.

Napätie na sekundárnom vinutí transformátora TR1 je usmernené pomocou mostíkového zapojenia 4 diód typu 1N4937 a vyfiltrované elektrolytickým kondenzátorom s veľkosťou kapacity 2200uF. Následne je privádzané na dvojicu stabilizátorov ktoré stabilizujú napätie na požadovanú hodnotu. Konkrétne na stabilizáciu napätia na 12V je použitý integrovaný stabilizátor typu 7812TV a na 5V stabilizátor 7805TV. K výstupu stabilizátorov sú znova paralelne pripojené filtračné fóliové kondenzátory o veľkosti 100nF. Takto upravené napätia sú privádzané na výstupné konektory.

### 3.3 Výpočet symetrického zdroja napätia

#### Výpočet sekundárneho napätia transformátora

$$U_{SEK} = \frac{U_{CC}}{\sqrt{2}} + U_D = \frac{25}{\sqrt{2}} + 1 = 18,68V \quad (3.1)$$

$U_{CC}$  ... Požadované napájacie napätie koncového zosilňovača

$U_D$  ... Úbytok napätia na diódach v mostíkovom zapojení

$U_{SEK}$  ... Vypočítané napätie sekundárneho vinutia transformátora

Pozn.: Zvolený transformátor s výstupným sekundárnym napätím  $U_{SEKR} = 2 \times 19V$ .

#### Výpočet skutočného sekundárneho napätia zvoleného transformátora

$$U_{CCR} = (U_{SEKR} - U_D) \times \sqrt{2} = (19 - 1) \times \sqrt{2} = 25,45V \quad (3.2)$$

$U_{CCR}$  ... Reálna veľkosť výstupného napájacieho napätia

$U_{SEKR}$  ... Sekundárne napätie zvoleného transformátora

### Výpočet veľkosti prúdu pri maximálnom vybudení zosilňovača

$$I_R = \frac{P_C}{U_{CCR}} = \frac{120}{25,45} = 4,72A \quad (3.3)$$

$I_R$ ... Reálna veľkosť prúdu odoberaného koncovým zosilňovačom

$P_C$ ... Výkon koncového zosilňovača

### Výpočet hodnoty zdanlivého výkonu transformátora s 30% rezervou

$$P_{TRREAL} = I_R \times U_{CCR} \times 2 \times 1,3 = 4,72 \times 25,45 \times 2 \times 1,3 = 312,32W \quad (3.4)$$

$P_{TRREAL}$ ... Hodnota zdanlivého výkonu transformátora s 30% rezervou

### Výpočet kapacity filtračného kondenzátora

$$C = \frac{k \times n \times I_R}{p \times U_{CCR}} = \frac{300 \times 2 \times 4,72}{5 \times 25,45} = 22225\mu F \quad (3.5)$$

$k$ ... Konštanta pre usmerňovací mostík

$I_S$ ... Reálna veľkosť prúdu odoberaného koncovým zosilňovačom

$U_{CCR}$ ... Reálna veľkosť napájacieho napätia

$p$ ... Zvlnenie výstupného napätia v %

$n$ ... Počet výkonových zosilňovačov pripojených k zdroju

### 3.4 Výpočet napätia nesymetrického zdroja

#### Výpočet sekundárneho napätia transformátora

$$U_{SEK2} = \frac{U_{CC2}}{\sqrt{2}} + U_{D2} = \frac{12}{\sqrt{2}} + 0,6 = 9,085V \quad (3.6)$$

$U_{CC2}$  ... Požadované napájacie napätie pomocných obvodov

$U_{D2}$  ... Úbytok napätia na diódach v mostíkovom zapojení

$U_{SEK2}$  ... Vypočítané napätie sekundárneho vinutia transformátora

Pozn.: Zvolený transformátor s výstupným sekundárnym napätím  $U_{SEKR2} = 10V$ .

#### Výpočet skutočného sekundárneho napätia zvoleného transformátora

$$U_{CCR2} = (U_{SEKR2} - U_{D2}) \times \sqrt{2} = (10 - 0,6) \times \sqrt{2} = 13,29V \quad (3.7)$$

$U_{CCR2}$  ... Reálna veľkosť výstupného napájacieho napätia

$U_{SEKR2}$ ... Sekundárne napätie zvoleného transformátora

## 4 CHLADENIE

Podľa Joule-Lencovho zákona je bežným javom pri práci výkonových zosilňovačov aj vznikajúce teplo. To vzniká v dôsledku stratového výkonu v integrovaných obvodoch zosilňovača. Toto teplo je nutné do okolitého priestoru odvieť preto, aby príliš vysoká teplota nezmenila parametre daného obvodu, prípadne ho nepoškodila alebo neviedla k jeho deštrukcii. Z toho dôvodu je potrebné pre navrhnuté zapojenie vypočítať potrebné parametre chladiča [10].

### 4.1 Výpočet potrebného chladiča

Každý blok koncového zosilňovača, teda mostíkového zapojenia dvoch integrovaných obvodov TDA7294 pre ľavý a pravý kanál, bude umiestnený na jeden samostatný chladič.

#### Výpočet stratového výkonu (prevzaté z [11])

$$P_{Z(MAX)} = \frac{P_{ZOS} \times (100 - \eta)}{100} = \frac{120 \times (100 - 73,04)}{100} = 32,35W \quad (4.1)$$

$P_{Z(MAX)}$ ... Stratový výkon koncového zosilňovača

$P_{ZOS}$ ... Výkon jedného koncového zosilňovača

$\eta$ ... Účinnosť zosilňovača

#### Výpočet celkového tepelného odporu (prevzaté z [11])

$$R_{tvp} = \frac{t_v - t_0}{P_{Z(MAX)}} = \frac{150 - 45}{32,35} = 3,24^{\circ}C/W \quad (4.2)$$

$R_{tvp}$ ... Celkový tepelný odpor

$t_v$ ...Maximálna teplota integrovaného obvodu udávaná výrobcom

$t_0$ ...Okolité teplota vo vnútri zariadenia

### Výpočet tepelného odporu chladiča (prevzaté z [11])

$$R_{tc} = R_{tvp} - R_{tp} - R_{tv} = 3,24 - 0,3 - 1,5 = 1,44^{\circ}\text{C/W}$$

(4.3)

$R_{tc}$ ...Teplotný odpor chladiča potrebný k uchladeniu jedného výkonového stupňa

$R_{tp}$ ... Teplotný odpor plastickej podložky

$R_{tv}$ ... Teplotný odpor puzdra súčiastky

$R_{tvp}$ ...Celkový tepelný odpor

## **5 NÁVRH A VÝROBA DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV**

Dosky plošných spojov boli navrhované vo vývojovom prostredí Eagle od firmy CADsoft. Jednotlivé dosky plošných spojov sú v prílohe B a ich osadzovacie plány v prílohe C. Všetky dosky plošných spojov boli vyrobené fotocestou na fotocitlivé DPS v domácom prostredí.

### **5.1 Návrh DPS predzosilňovača s mikrokontrolérom**

Spojenie predzosilňovača a jeho riadenie mikrokontrolérom bolo koncipované na jednu dosku plošných spojov spolu s digitálnymi potenciometrami. DPS je obojstranná, sú v nej použité aj prekovy (vid príloha B, obrázok III, obrázok IV).

### **5.2 Návrh DPS výkonových stupňov**

Jedna doska plošného spoja výkonových stupňov je navrhnutá ako jednostranná. Obsahuje mostíkové zapojenie dvoch integrovaných zosilňovačov TDA7294. Je teda koncipovaná ako výkonový zosilňovač pre jeden kanál (vid príloha B, obrázok V). Vo finálnom zostavení budú použité dve rovnaké DPS.

### **5.3 Návrh DPS zdroja napätia**

DPS zdroja je projektovaná ako jednostranná doska rozdelená na dve časti prepojené spoločnou zemou. Minimálna hrúbka ciest je dodržaná podľa normy a sú na nej osadené konektory typu FASTON pre pripojenie k ďalším zariadeniam (vid príloha B, obrázok VI).

### **5.4 Návrh DPS ovládacieho panelu**

Doska ovládacieho panela je vyrobená ako jednostranná, pričom rozmiestnenie tlačidlových spínačov bolo navrhnuté pre finálne umiestnenie celej DPS na predný panel konštrukcie zariadenia (vid príloha B, obrázok VII).



## 6 MERANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV

Po realizácii a oživení jednotlivých obvodov boli zmerané ich základné parametre. Ďalšie kapitoly sú rozdelené na samostatné meranie vlastností predzosilňovača a meranie vlastností výkonového zosilňovača

### 6.1 Meranie korekčného predzosilňovača

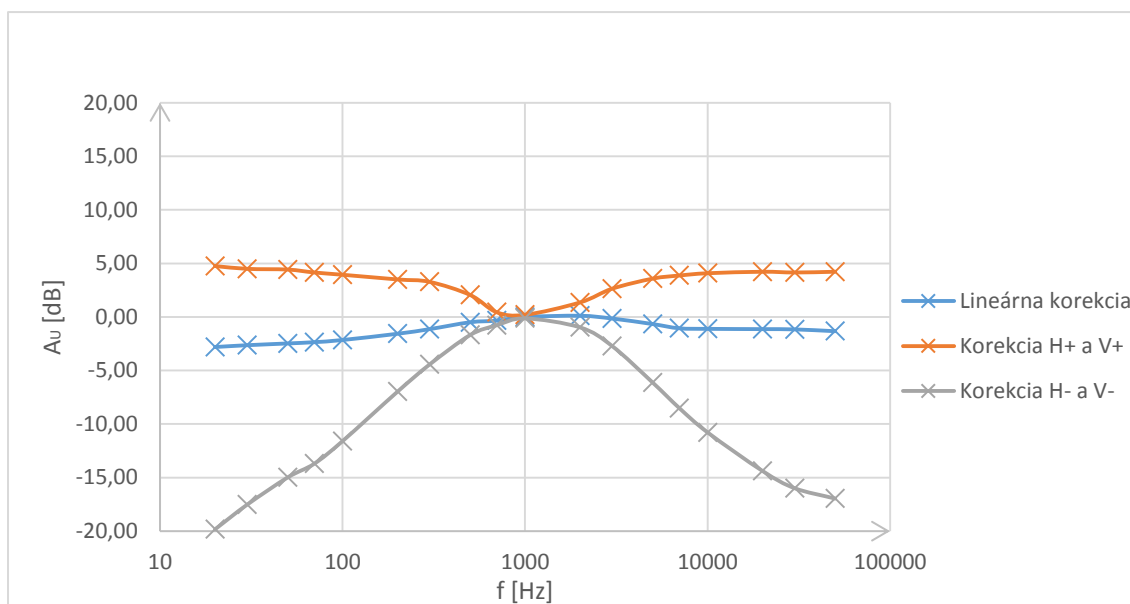
V tejto kapitole sú zhrnuté zmerané základné vlastnosti predzosilňovača pričom niektoré vybrané parametre sú zobrazené v grafoch.

#### 6.1.1 Meranie modulovej kmitočtovej charakteristiky

Modulová kmitočtová charakteristika bola zmeraná postupne pre lineárnu korekciu, korekciu s maximálnym zdôraznením funkcií bass a treble a korekciu s maximálnym potlačením funkcií bass a treble. Pre meranie bol vybraný ľavý kanál a vstupné napätie z generátora  $U_1=775\text{mV}$

Tab. 3: Modulová kmitočtová charakteristika korekcií (vlastné spracovanie)

Modulová kmitočtová charakteristika ( $U_1 = 775\text{mV}$ )						
	Lineár		H+, V+		H-, V-	
f[Hz]	$U_2[\text{mV}]$	$A_u[\text{dB}]$	$U_2[\text{mV}]$	$A_u[\text{dB}]$	$U_2[\text{mV}]$	$A_u[\text{dB}]$
20	561	-2,81	1340	4,76	79	-19,83
30	572	-2,64	1300	4,49	103	-17,53
50	583	-2,47	1290	4,43	138	-14,99
70	591	-2,35	1250	4,15	160	-13,70
100	605	-2,15	1220	3,94	204	-11,59
200	647	-1,57	1160	3,50	347	-6,98
300	680	-1,14	1130	3,28	465	-4,44
500	732	-0,50	982	2,06	638	-1,69
700	745	-0,34	815	0,44	709	-0,77
1000	775	0,00	793	0,20	763	-0,14
2000	785	0,11	906	1,36	693	-0,97
3000	762	-0,15	1050	2,64	567	-2,71
5000	718	-0,66	1170	3,58	383	-6,12
7000	686	-1,06	1210	3,87	291	-8,51
10000	682	-1,11	1240	4,08	224	-10,78
20000	680	-1,14	1260	4,22	148	-14,38
30000	678	-1,16	1250	4,15	123	-15,99
50000	665	-1,33	1260	4,22	110	-16,96



Graf 1: Modulová kmitočtová charakteristika predzosilňovača pre kanál L (vlastné spracovanie)

#### Príklad výpočtu:

$$A_U = 20 \times \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \times \log \frac{561 \times 10^{-3}}{775 \times 10^{-3}} = -2,81 \text{ dB}$$

#### 6.1.2 Meranie závislosti regulácie hlasitosti

Závislosť regulácie hlasitosti bola zmeraná pre ľavý kanál korekčného predzosilňovača pri vstupnom napätí  $U_1 = 775 \text{ mV}$  a na kmitočte  $f = 1 \text{ kHz}$ .

Tab. 4: Závislosť regulácie hlasitosti korekčného zosilňovača (vlastné spracovanie)

L kanál ( $U_1 = 775 \text{ mV}$ , $f = 1 \text{ kHz}$ )					
Hlasitosť [%]	$U_2 [\text{mV}]$	$A_U [\text{dB}]$	Hlasitosť [%]	$U_2 [\text{mV}]$	$A_U [\text{dB}]$
0	0,075	-80,28	52	19	-32,21
4	0,077	-80,06	56	33	-27,42
8	0,082	-79,51	60	55,3	-22,93
12	0,09	-78,70	64	86,7	-19,03
16	0,108	-77,12	68	125	-15,85
20	1,01	-57,70	72	169	-13,23
24	1,4	-54,86	76	218	-11,02
28	2,6	-49,49	80	274	-9,03
32	3,1	-47,96	84	332	-7,36
36	6,3	-41,80	88	434	-5,04
40	4,26	-45,20	92	567	-2,71
44	6,4	-41,66	96	715	-0,70
48	10,7	-37,20	100	775	0,00

**Príklad výpočtu:**

$$A_U = 20 \times \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \times \log \frac{0,075 \times 10^{-3}}{775 \times 10^{-3}} = -80,28 \text{ dB}$$

**6.1.3 Meranie závislosti regulácie vyváženia**

Meranie obsahuje závislosť zmeny funkcie balance korekčného zosilňovača voči veľkosti výstupného napätia. Počiatok merania je pri nastavení maximálneho zosilnenia ľavého kanálu a postupne prechádza k zosilneniu kanálu pravého. Meranie prebehlo pri vstupných parametroch  $U_1 = 775\text{mV}$  a  $f = 1\text{kHz}$ .

Tab. 5: Závislosť regulácie vyváženia korekčného predzosilňovača (vlastné spracovanie)

NASTAVENIE [%]		Ľavý kanál		Pravý kanál	
		U <sub>2L</sub> [mV]	A <sub>U</sub> [dB]	U <sub>2P</sub> [mV]	A <sub>U</sub> [dB]
Ľavý	100	785,0	0,11	14,4	-34,62
	96	784,0	0,10	26,9	-29,19
	92	784,0	0,10	55,0	-22,98
	88	783,0	0,09	87,0	-19,00
	84	782,0	0,08	122,0	-16,06
	80	781,0	0,07	169,0	-13,23
	76	780,0	0,06	227,0	-10,67
	72	780,0	0,06	293,0	-8,45
	68	776,0	0,01	370,0	-6,42
	64	769,0	-0,07	448,0	-4,76
	60	758,0	-0,19	520,0	-3,47
	56	745,0	-0,34	584,0	-2,46
	52	722,0	-0,62	636,0	-1,72
	50	692,0	-0,98	679,0	-1,15
	52	651,0	-1,51	707,0	-0,80
	56	597,0	-2,27	729,0	-0,53
	60	506,0	-3,70	735,0	-0,46
	64	532,0	-3,27	744,0	-0,35
	68	449,0	-4,74	756,0	-0,22
	72	369,0	-6,45	763,0	-0,14
	76	291,0	-8,51	766,0	-0,10
	80	210,0	-11,34	770,0	-0,06
	84	154,0	-14,04	773,0	-0,02
	88	114,0	-16,65	774,0	-0,01
	92	74,0	-20,40	775,0	0,00
	96	26,9	-29,19	776,0	0,01
Pravý	100	9,2	-38,51	778,0	0,03

### 6.1.4 Meranie presluchov medzi kanálmi

Signál z generátora signálu s amplitúdou  $U_1 = 775 \text{ mV}$  a frekvenciou  $f = 1 \text{ kHz}$  bol privedený na jeden kanál korekčného zosilňovača, pričom na opačnom výstupnom kanály bolo zmeraná veľkosť výstupného napätia.

Tab. 6: Presluchy korekčného zosilňovača (vlastné spracovanie)

Presluchy korekčného predzosilňovača ( $U_1 = 775 \text{ mV}$ )				
f [Hz]	Ľavý kanál $U_1 \Rightarrow$ Pravý kanál		Pravý kanál $U_1 \Rightarrow$ Ľavý kanál	
	$U_{2P} [\mu\text{V}]$	Presluch [dB]	$U_{2L} [\mu\text{V}]$	Presluch [dB]
10	346	-67,00	364	-66,56
1000	64,6	-81,58	55,5	-82,90
10000	1440	-54,62	1640	-53,49

### 6.1.5 Meranie vstupného odporu

Pri meraní bol do obvodu medzi generátor a korekčný zosilňovač do série pripojený ciachovaný rezistor s premenlivou hodnotou s maximálnou hodnotou odporu  $100 \text{ k}\Omega$ . Meranie bolo vykonané pri vstupnom napätí  $U_1 = 300 \text{ mV}$  a frekvencií  $1 \text{ kHz}$  pre každý kanál zvlášť. Veľkosť vstupného odporu bola určená pri poklese výstupného napätia na hodnotu  $U_2 = 150 \text{ mV}$ .

$$R_{\text{vst L}} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\text{vst P}} = 20 \text{ k}\Omega$$

### 6.1.6 Meranie harmonického skreslenia

Miera harmonického skreslenia bola zmeraná pri nastavených parametroch  $U_1 = 775 \text{ mV}$  a frekvencii  $f = 1 \text{ kHz}$ .

Tab. 7: Meranie harmonického skreslenia (vlastné spracovanie)

Harmonické skreslenie ( $U_1 = 775 \text{ mV}$ , $f = 1 \text{ kHz}$ )				
Kanál	$U_2$ [mV]	$k_2$ [%]	$k_3$ [%]	THD+N [%]
Ľavý	102	0,1486	0,0587	0,176
	214	0,0917	0,0326	0,182
	301	0,161	0,0544	0,183
	560	0,1143	0,0419	0,151
	775	0,1354	0,0499	0,192
	956	0,5325	0,1488	0,735
Pravý	114	0,1412	0,0587	0,168
	217	0,0904	0,0342	0,178
	312	0,1627	0,0574	0,185
	540	0,1243	0,0468	0,171
	779	0,1288	0,0502	0,179
	977	0,29	0,0907	0,572

### 6.1.7 Použité prístroje

Nízkočfrekvenčný funkčný generátor Agilent 33220A

Nízkočfrekvenčný milivoltmeter Grundig MV100

Digitálny osciloskop RIGOL DS1052E

Premenlivý odpor  $100 \text{ k}\Omega$

## 6.2 Meranie výkonového zosilňovača

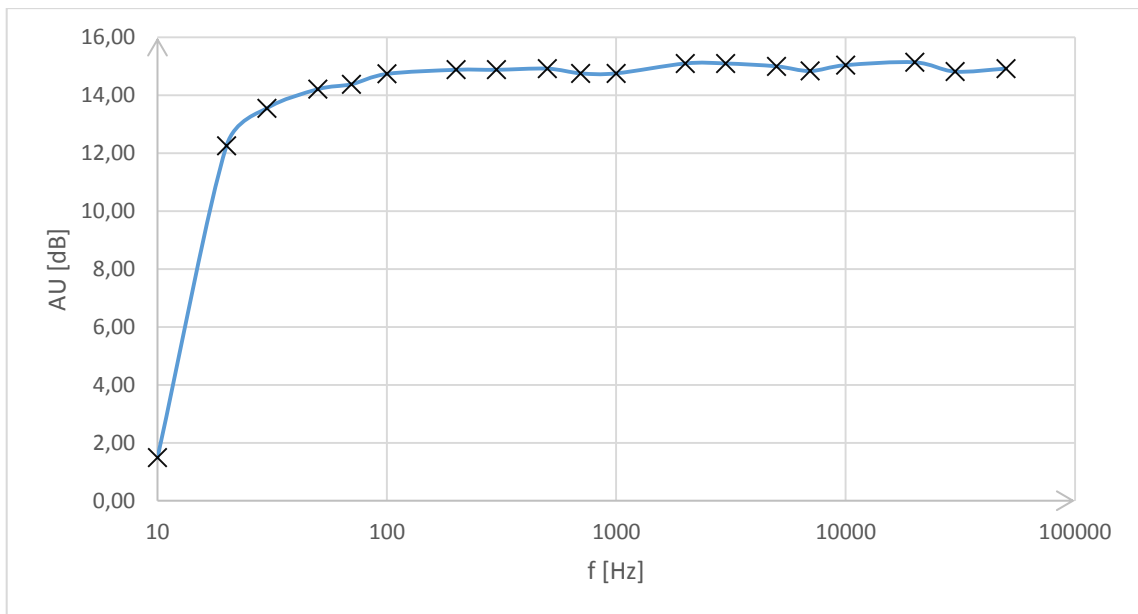
V tejto kapitole sú zhrnuté výsledky meraní základných vlastností a parametrov výkonového zosilňovača. Z dôvodu identickosti jednotlivých zapojení zosilňovača ľavého a pravého kanála, boli zmerané a zapísané hodnoty meraní len pre ľavý kanál pričom na pravom kanály boli vykonané kontrolné merania pre potvrdenie zmeraných údajov.

### 6.2.1 Meranie modulovej kmitočtovej charakteristiky

Modulová kmitočtová charakteristika bola zmeraná pri vstupnom napätí  $U_1 = 100 \text{ mV}$ .

Tab. 8: Modulová kmitočtová charakteristika (vlastné spracovanie)

Modulová kmitočtová charakteristika ( $U_1 = 100\text{mV}$ )		
f[Hz]	$U_2[\text{V}]$	$A_u[\text{dB}]$
10	0,92	1,49
20	3,18	12,26
30	3,69	13,55
50	3,98	14,21
70	4,06	14,38
100	4,23	14,74
200	4,30	14,88
300	4,30	14,88
500	4,32	14,92
700	4,24	14,76
1000	4,24	14,76
2000	4,41	15,10
3000	4,41	15,10
5000	4,36	15,00
7000	4,28	14,84
10000	4,38	15,04
20000	4,43	15,14
30000	4,27	14,82
50000	4,32	14,92



Graf 2: Modulová kmitočtová charakteristika výkonového zosilňovača (vlastné spracovanie)

#### Príklad výpočtu:

$$A_U = 20 \times \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \times \log \frac{0,92}{100 \times 10^{-3}} = 1,49 \text{ dB}$$

### 6.2.2 Meranie maximálneho výstupného výkonu

Meranie maximálneho výstupného výkonu zosilňovača bolo uskutočnené pri jeho limitácii, teda pri začiatku skresľovania výstupného signálu pri vstupnej frekvencii  $f = 1 \text{ kHz}$  a pripojenej záťaži  $R_Z = 8 \Omega$ .

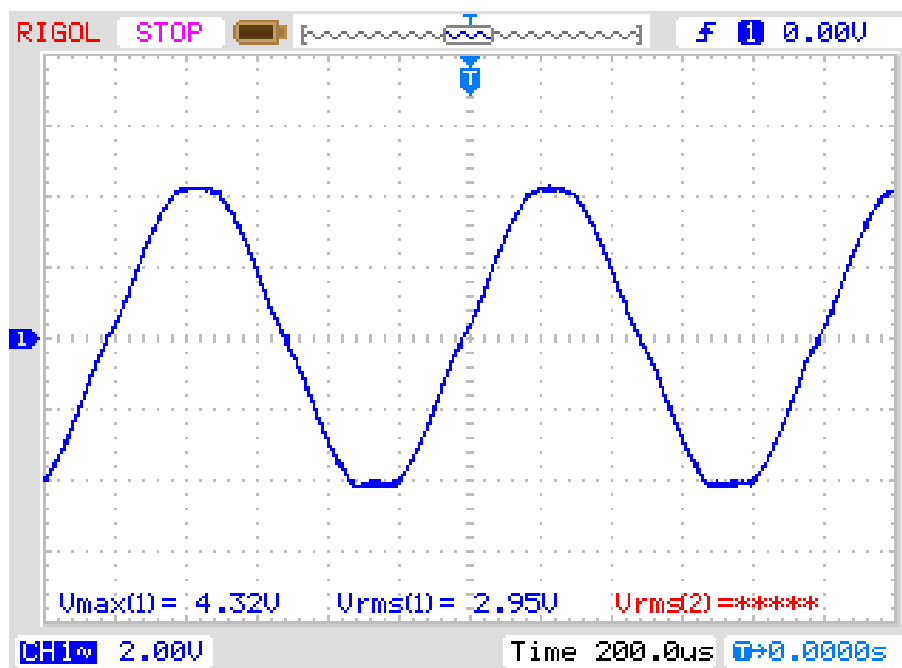
Zmerané výstupné napätie:  $U_{\text{vyst}} = 29,5 \text{ V}$

$$P_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{vyst}}^2}{R_Z} = \frac{29,5^2}{8} = 108,78 \text{ W}$$

$P_{\text{MAX}}$ ... Maximálny výstupný výkon

$U_{\text{vyst}}$ ... Zmerané výstupné napätie

$R_Z$ ... Odpor záťaže



Obr. 19: Limitácia výkonového zosilňovača (vlastné spracovanie)

### 6.2.3 Meranie účinnosti

Účinnosť zosilňovača je vyjadrená ako pomer maximálneho výstupného výkonu a príkonu koncového stupňa.

Zmerané hodnoty:  $U_N = 25,5 \text{ V}$ ,  $I_N = 2,93 \text{ A}$

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{U_N \times I_N \times 2} = \frac{108,78}{25,5 \times 2,93 \times 2} \times 100 = 72,8 \%$$

$\eta$ ... Účinnosť koncového stupňa

$P_{MAX}$ ... Maximálny výstupný výkon

$U_N$ ... Zmerané napätie na svorkách zosilňovača

$I_N$ ... Zmeraný prúd vo vetve zosilňovača



#### 6.2.4 Meranie vstupného odporu

Veľkosť vstupného odporu bola zmeraná ciachovaným premenlivým rezistorom pripojeným v sérii medzi generátor signálu a výkonový zosilňovač. Meranie prebehlo na frekvencii 1 kHz.

Vstupný odpor  $R_{vst} = 15 \text{ k}\Omega$

#### 6.2.5 Meranie výstupného odporu

Meranie bolo spracované pri pripojenej záťaži  $R_Z = 8 \text{ }\Omega$ , a pri frekvencii  $f = 1 \text{ kHz}$ .

Zmerané hodnoty:  $U_0 = 6,62 \text{ V}$ ,  $U_2 = 6,54 \text{ V}$

$$R_{výst} = \frac{U_0 - U_2}{U_2} = \frac{6,62 - 6,54}{6,54} = 0,098 \text{ }\Omega$$

$R_{výst}$ ... Výstupný odpor zosilňovača

$U_0$ ... Zmerané výstupné napätie na nekonečnej záťaži

$U_2$ ... Zmerané výstupné napätie na záťaži  $8\Omega$

#### 6.2.6 Činiteľ tlmenia záťaže

$$D = \frac{R_Z}{R_{výst}} = \frac{8}{0,098} = 81,63$$

$D$ ... Činiteľ tlmenia záťaže

$R_{výst}$ ... Výstupný odpor zosilňovača

$R_Z$ ... Odpor záťaže

### 6.2.7 Meranie rýchlosti prebehu SR (Slew Rate)

Meranie predstavovalo zmenu rýchlosti reakcie zosilňovača na budenie obdĺžnikovým signálom. Pri tesnom podlimitnom výkone bola zmeraná strmosť nábežnej a dobežnej hrany zosilneného výstupného obdĺžnikového signálu.

#### Zmerané parametre:

Rýchlosť prebehu nábežnej hrany:  $\Delta U = 5,48 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 3,40 \text{ }\mu\text{s}$

$$SR_{rise} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{5,48}{3,40} = 1,61 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Rýchlosť prebehu dobežnej hrany:  $\Delta U = 5,32 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 3,52 \text{ }\mu\text{s}$

$$SR_{fall} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{5,32}{3,52} = 1,51 \text{ V}/\mu\text{s}$$

$SR_{rise}$ ...Rýchlosť prebehu nábežnej hrany

$SR_{fall}$ ...Rýchlosť prebehu dobežnej hrany

$\Delta U$ ... Rozdiel napätí medzi 10% a 90% nábežnej alebo dobežnej hrany

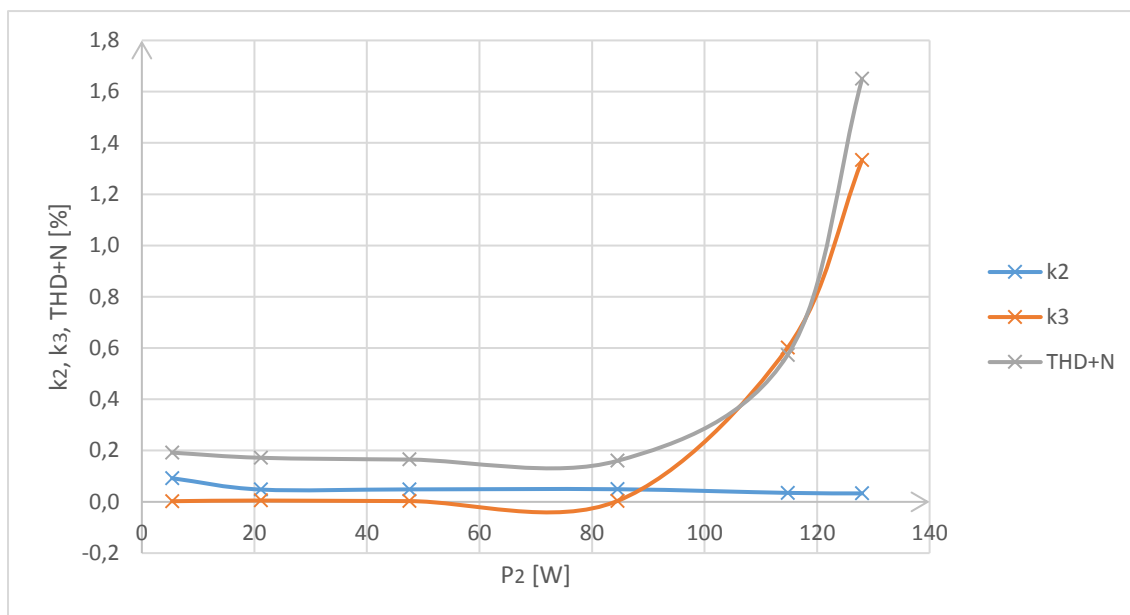
$\Delta t$ ... Rozdiel času medzi 10% a 90% nábežnej alebo dobežnej hrany

### 6.2.8 Meranie harmonického skreslenia

Miera harmonického skreslenia bola zmeraná pri rôznych hodnotách výstupného výkonu, frekvencii  $f = 1 \text{ kHz}$  a pripojenej záťaži .

Tab. 9: Harmonické skreslenie zosilňovača (vlastné spracovanie)

Meranie harmonického skreslenia zosilňovača ( $f=1\text{kHz}$ , $R_z=8\Omega$ )				
$U_2[\text{V}]$	$P_2[\text{W}]$	$k_2[\%]$	$k_3[\%]$	THD+N[%]
6,6	5,38	0,0923	0,0026	0,192
13,0	21,13	0,0480	0,0053	0,172
19,5	47,53	0,0487	0,0030	0,165
26,0	84,50	0,0493	0,0034	0,160
30,3	114,76	0,0350	0,6013	0,573
32,0	128,00	0,0330	1,3330	1,650



Graf 3: Harmonické skreslenie zosilňovača (vlastné spracovanie)

**Príklad výpočtu:**

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_Z} = \frac{13^2}{8} = 21,13 \text{ W}$$

### 6.2.9 Použité prístroje

Nízkofrekvenčný funkčný generátor Agilent 33220A

Nízkofrekvenčný milivoltmeter Grundig MV100

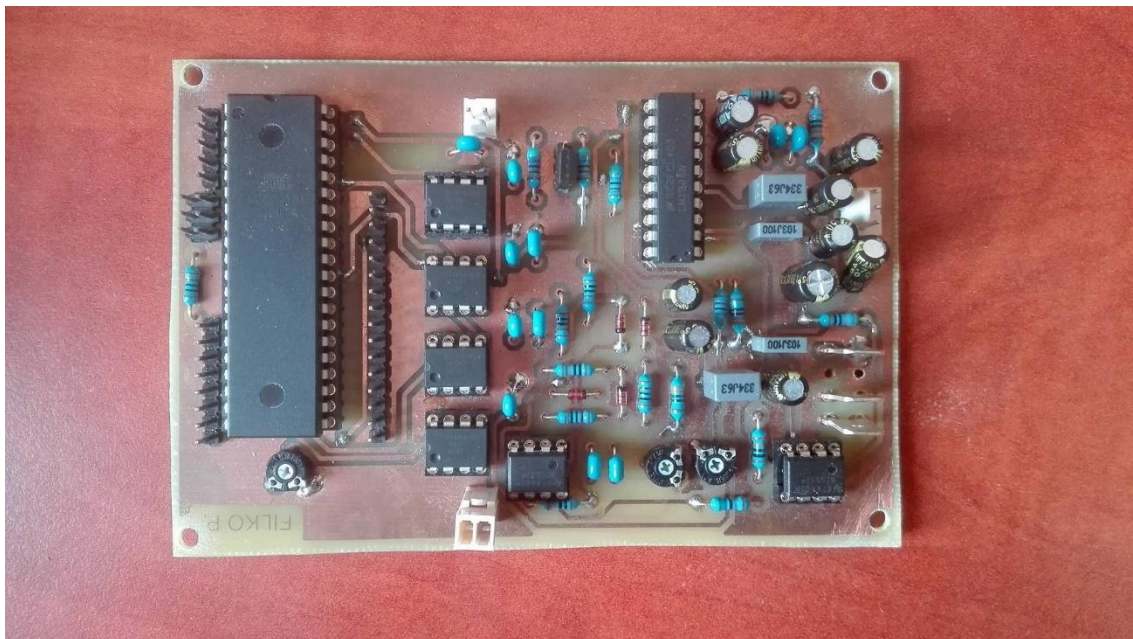
Digitálny osciloskop RIGOL DS1052E

Premenlivý odpor 100kΩ

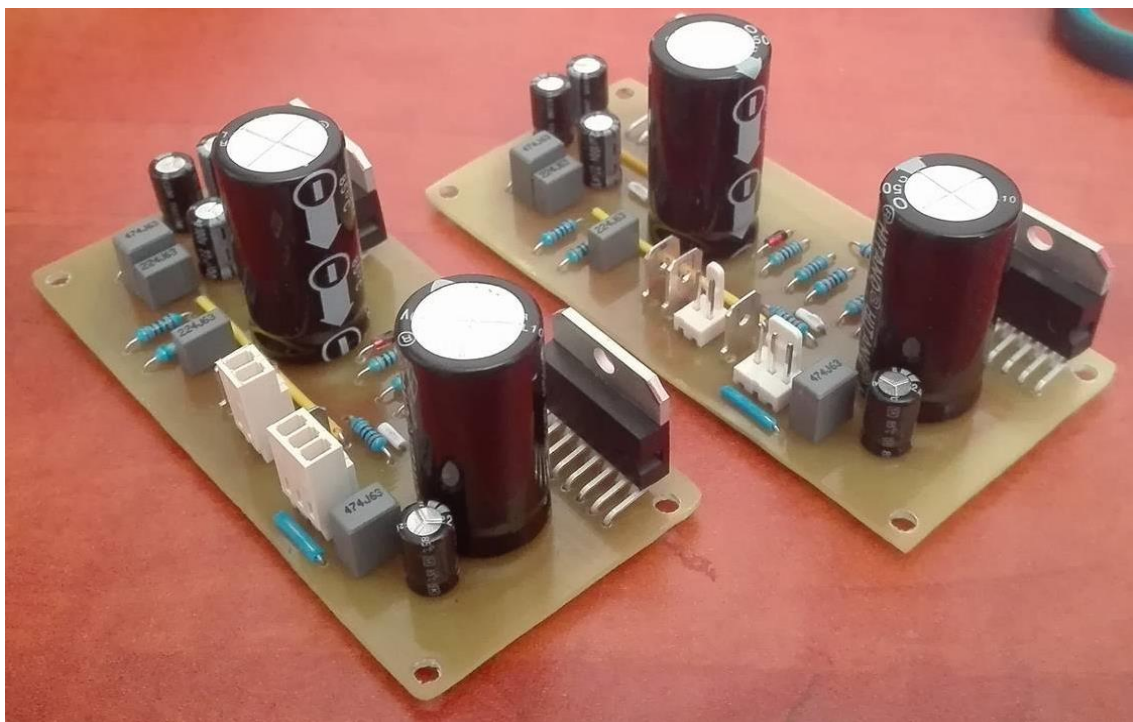
Digitálny multimeter AXIO AX-105

Digitálny multimeter DT-830B

## 7 FOTODOKUMENTÁCIA



Obr. 20: Pohľad na predzosilňovač riadený mikrokontrolérom



Obr. 21: Pohľad na výkonové zosilňovače



Obr. 22: Pohľad na zadný panel a konštrukciu zosilňovača



Obr. 23: Pohľad na predný panel zosilňovača.



## ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bol návrh audio výkonového zosilňovača s výstupným výkonom 2 x 100W, ktorého vybrané funkcie sú riadené mikrokontrolérom. V prvej časti práce bola v teoretickom rozbere rozobraná problematika tejto témy a možnosti jej riešenia. Nadviazaním na teoretické poznatky bol v druhej časti vypracovaný koncept podľa ktorého finálne zariadenie plní svoj účel. Na vytvorenie korekčného predzosilňovača bol ako základný prvok zvolený integrovaný obvod LM1036N, ktorý už sám obsahuje funkcie korekcií hlasitosti, balance, výšok a basov. Na zosilnenie signálu na požadovaný výkon bolo z dôvodu jednoduchosti a v pomere s cenovou nenáročnosťou zvolené mostíkové zapojenie integrovaného obvodu TDA7294 pre každý zosilňovaný hudobný kanál. Z dôvodu neexistujúcich modelov prvkov zosilňovača pre program PSpice nemohli byť prevedené jeho jednotlivé simulácie. K jednotlivým blokom boli navrhnuté príslušné napájacie zdroje a vypočítaný tepelný odpor chladiča zaručujúci bezproblémovú prácu jednotlivých výkonových súčastí. Po realizácii a oživení jednotlivých blokov boli zmerané ich základné parametre.

Prvá časť kapitoly merania sa zameriava a zhodnocuje výsledky vlastností korekčného predzosilňovača. Graf modulovej kmitočtovej charakteristiky jasne preukazuje jeho funkčnosť na celom frekvenčnom rozsahu 20 Hz až 20 kHz. Zároveň preukazuje spôsobilosť maximálneho zdôraznenia a potlačenia jeho základných funkcií bass a treble. V nadväzujúcej časti je meraním dokázaná funkčnosť odozvy na zmenu nastavenia hlasitosti ktorá pri nastavených 0 % vykazuje rozdiel voči vstupnému signálu rádovo až 80dB čo prevyšuje požadované a výrobcom garantované nároky. Z merania vyváženia medzi jednotlivými kanálmi je zrejmá ich účelnosť kedy signál ľavého kanálu postupne zoslabuje, pričom v pravom narastá. Pri voľbe nastavenia na 50 % majú oba kanály približne rovnaké výstupné zosilnenie. Ďalšia časť merania jasne preukazuje minimálne presluchy medzi kanálmi na celom frekvenčnom rozsahu čo kladie jasné pozitívum využitia daného korekčného predzosilňovača. Vstupný odpor meraný pomocou ciachovaného premenlivého odporu bol odhadnutý približne na 20 kΩ čo je minimálna hranica udávaná výrobcom. Výsledok merania harmonického skreslenia pre oba kanály korekčného predzosilňovača je približne rovnaký. Výrobcom udávaná miera harmonického

skreslenia je takmer totožná so zmeranou a činí maximálne 0,2 %. I napriek chýbajúcej simulácii sa dá zhodnotiť, že korekčný predzosilňovač plní svoj účel a úroveň jeho funkčnosti je vysoká.

Druhá časť kapitoly venovanej meraniu sa zameriava na meranie vlastností výkonových častí zosilňovača a ich parametrov. Z merania modulovej kmitočtovej charakteristiky a z vytvoreného grafu je opäť viditeľná správna funkčnosť a účelnosť zapojenia na celom frekvenčnom rozsahu 20 Hz až 20 kHz. Ďalšia časť merania len potvrdzuje teoretický predpoklad veľkosti výstupného výkonu. Kvadrátúrna hodnota zmeranej miery výstupného napätia zosilňovača v pomere s pripojenou záťažou vykazuje tesne pred limitáciou maximálny výstupný výkon až 108,78 W, čo ďaleko prevyšuje nároky požadované na výkonový zosilňovač. Z parametru maximálneho výkonu zosilňovača prepočet na účinnosť vykazuje hodnotu až 72,8%. Vstupný odpor bol znova pomocou ciachovaného premenlivého odporu pripojeného do série k vstupným svorkám signálu zmeraný na hodnotu 15 k $\Omega$ . Výstupný odpor bol zase pri pripojenej výstupnej záťaži  $R_z = 8 \Omega$  vypočítaný na hodnotu 0,098  $\Omega$ , z čoho ďalej vyplýva aj veľkosť činiteľa tlmenia záťaže 81,63. Výkonový zosilňovač vykazuje dobré hodnoty aj pre zmenách reakcie na obdĺžnikový signál. Osciloskopom zmeraná a vypočítaná rýchlosť prebehu nábežnej hrany  $SR_{rise}$  s hodnotou 1,61 V/ $\mu$ s len dokazuje rýchlosť reakcie na zmenu signálu. Rovnako ako aj rýchlosť prebehu dobežnej hrany  $SR_{fall}$  s hodnotou 1,51 V/ $\mu$ s. Posledné meranie v tejto podkapitole je určené harmonickému skresleniu zosilňovača. Z nameraných hodnôt a priloženého grafu je zrejmé, že oproti údajom udávaných výrobcami veľkosť skreslenia je pri nižších kmitočtoch málo nadlimitná, pri vyšších kmitočtoch korešponduje s údajmi katalógu zosilňovača čo zároveň bola jedna z požiadaviek na celé zapojenie.

Namerané a vypočítané hodnoty základných parametrov a funkcií celého zapojenia zosilňovača len dokazujú jeho funkčnosť a práceschopnosť na celom frekvenčnom aj výkonovom požadovanom rozsahu.

## LITERATÚRA

- [1] KOTISA, Z. *NF zesilovače: Předzesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 95 s. ISBN 80-730-0030-X.
- [2] KOTISA, Z. *NF zesilovače 2 - integrované výkonové zesilovače*. Praha: BEN – technická
- [3] LÁNÍČEK, R. *Elektronika, obvody – součástky – děje*. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 479 s. ISBN 80-86056-25-2
- [4] KRATOCHVÍL, T. *Třídy a vlastnosti zesilovačů, předzesilovače* [online]. Vysoké učení technické v Brně, ústav radioelektroniky: 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=309545>
- [5] Wirsum, S. *Abeceda nf techniky*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 192s. ISBN 80-86056-26-0
- [6] TEXAS INSTRUMENTS, *Katalógové listy LM1036 Dual DC Operated Tone/Volume/Balance Circuit*. Texas Instruments Incorporated 2015, 21s. Dostupné z: <<https://www.ti.com>> [cit. 14.12.2015]
- [7] MAXIM, *Katalógové listy DS1804 Nonvolatile Trimmer Potentiometer. Maxim integrated* 2011, 10s. Dostupné z: <<http://www.alldatasheet.com>> [cit. 17.12.2015]
- [8] STMICROELECTRONICS, *Katalogové listy TDA7294 100V - 100W DMOS AUDIO AMPLIFIER WITH MUTE/ST-BY*. STMicroelectronics 2003, 17s. Dostupné z: <<http://www.alldatasheet.com>> [cit. 15.12.2015]
- [9] TEXAS INSTRUMENTS, *Katalogové listy NE5532, NE5532A DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS*. Texas Instruments Incorporated 2002, 5s. Dostupné z: <<https://www.ti.com>> [cit. 15.12.2015]



- [10] FUKÁTKO, Jaroslav, Jiří ŠINDELKA a Tomáš FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice*. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-24-4.
- [11] FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN technická literatura, 2006, 120s. ISBN 80-7300-199-3
- [12] CORDELL, Bob. *Designing audio power amplifiers*. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780071640251.
- [13] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. *Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4]*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-406-4.
- [14] *8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash: ATmega16, ATmega16L* [online]. Atmel Corporation, San Jose, 2010 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1: Bloková schéma nízkofrekvenčného audio zosilňovača .....	11
Obr. 2: Bloková schéma zosilňovača so spätnou väzbou .....	15
Obr. 3: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača triedy A .....	17
Obr. 4: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača triedy B.....	18
Obr. 5: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača v triede AB.....	19
Obr. 6: Nastavenie pracovného bodu zosilňovača v triede C .....	19
Obr. 7: Princíp zosilňovača s impulzne šírkovou moduláciou (Trieda D). ....	20
Obr. 8: Bloková schéma integrovaného zosilňovača.....	21
Obr. 9: Bloková schéma audio výkonového zosilňovača .....	23
Obr. 10: Vnútná bloková schéma integrovaného obvodu LM1036N. ....	24
Obr. 11: Schéma zapojenia predzosilňovača s mikrokontrolérom .....	26
Obr. 12: Bloková schéma digitálneho potenciometra DS1804 .....	28
Obr. 13: Vývojový diagram pre obsluhu potenciometrov .....	30
Obr. 14: Vnútné blokové zapojenie zosilňovača TDA7294. ....	33
Obr. 15: Závislosť skreslenia T.H.D na výstupnom výkone. ....	35
Obr. 16: Frekvenčná charakteristika obvodu TDA7294.....	36
Obr. 17: Schéma zapojenia jedného výkonového stupňa. ....	36
Obr. 18: Schéma zapojenia napájacieho zdroja.....	38
Obr. 19: Limitácia výkonového zosilňovača .....	52
Obr. 20: Pohľad na predzosilňovač riadený mikrokontrolérom .....	56
Obr. 21: Pohľad na výkonové zosilňovače .....	56
Obr. 22: Pohľad na zadný panel a konštrukciu zosilňovača.....	57
Obr. 23: Pohľad na predný panel zosilňovača. ....	57

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1: Základné parametre obvodu LM1036N. ....	25
Tab. 2: Základné parametre obvodu TDA7294. ....	34
Tab. 3: Modulová kmitočtová charakteristika korekcií .....	45
Tab. 4: Závislosť regulácie hlasitosti korekčného zosilňovača .....	46
Tab. 5: Závislosť regulácie vyváženia korekčného predzosilňovača .....	47
Tab. 6: Presluchy korekčného zosilňovača .....	48
Tab. 7: Meranie harmonického skreslenia .....	49
Tab. 8: Modulová kmitočtová charakteristika .....	50
Tab. 9: Harmonické skreslenie zosilňovača .....	54

## ZOZNAM GRAFOV

Graf 1: Modulová kmitočtová charakteristika predzosilňovača pre kanál L....	46
Graf 2: Modulová kmitočtová charakteristika výkonového zosilňovača .....	51
Graf 3: Harmonické skreslenie zosilňovača .....	55

## **ZOZNAM PRÍLOH**

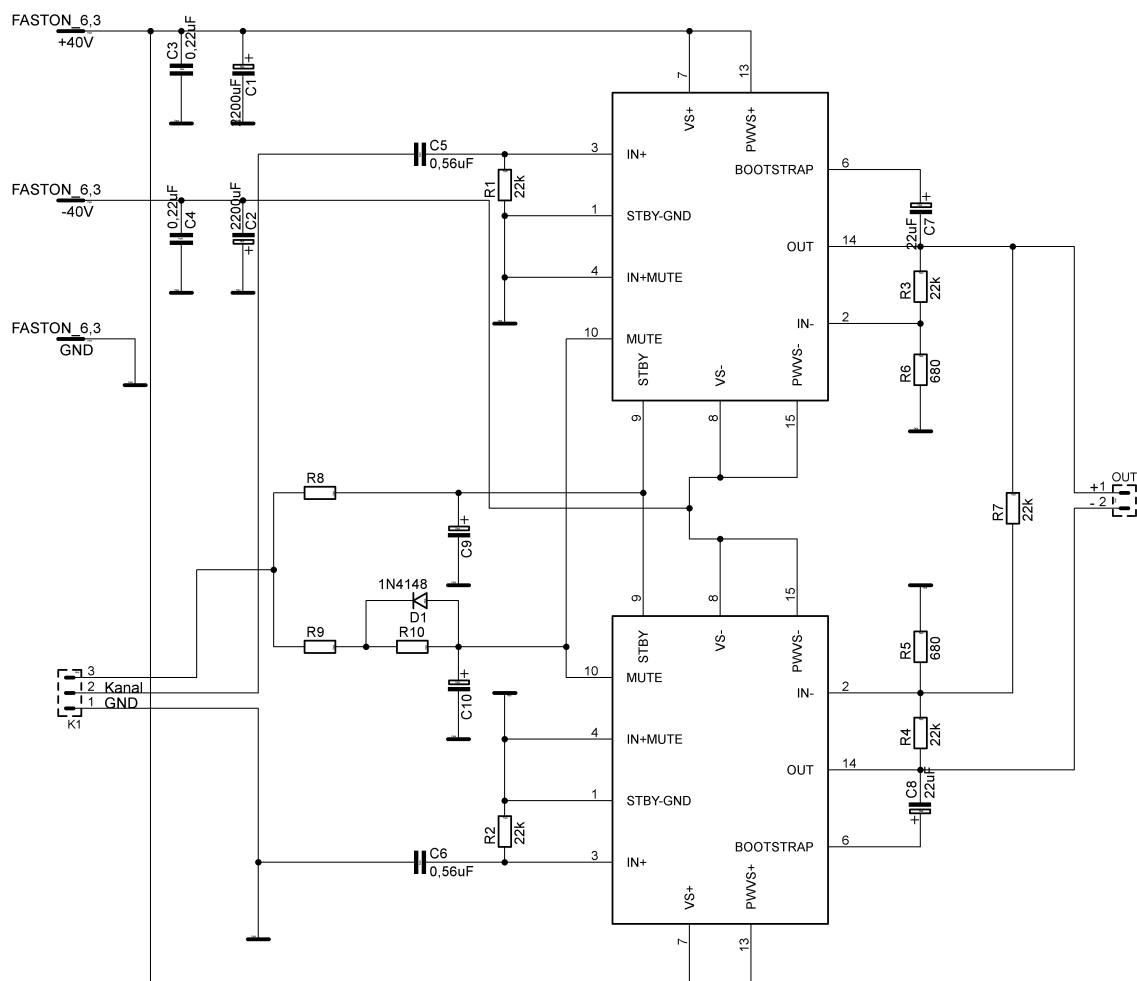
**Príloha A:** Schémy zapojení

**Príloha B:** Dosky plošných spojov

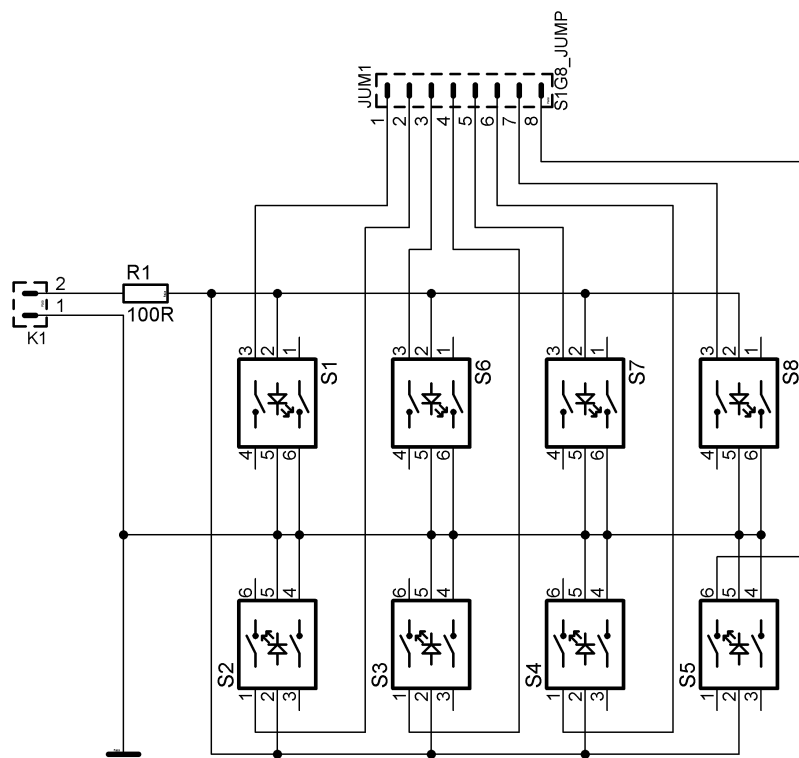
**Príloha C:** Osadzovacie plány

**Príloha D:** Zoznamy súčiastok

## Príloha A

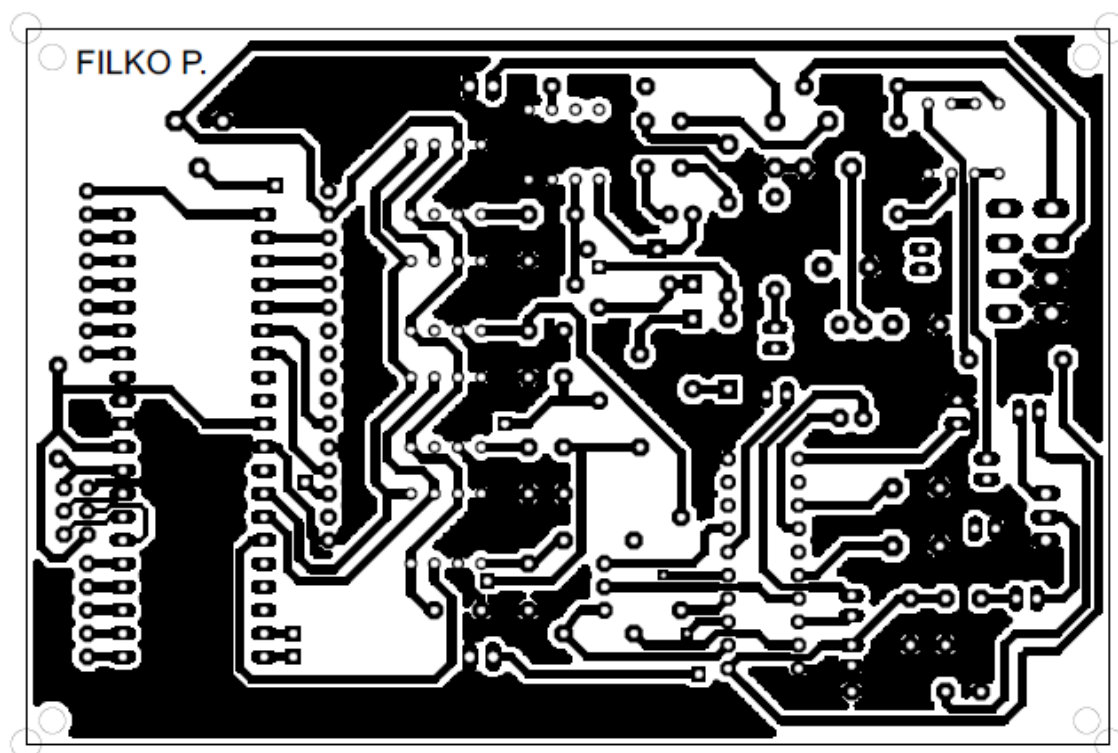


Obrázok I: Schéma zapojenia výkonového zosilňovača pre jeden kanál

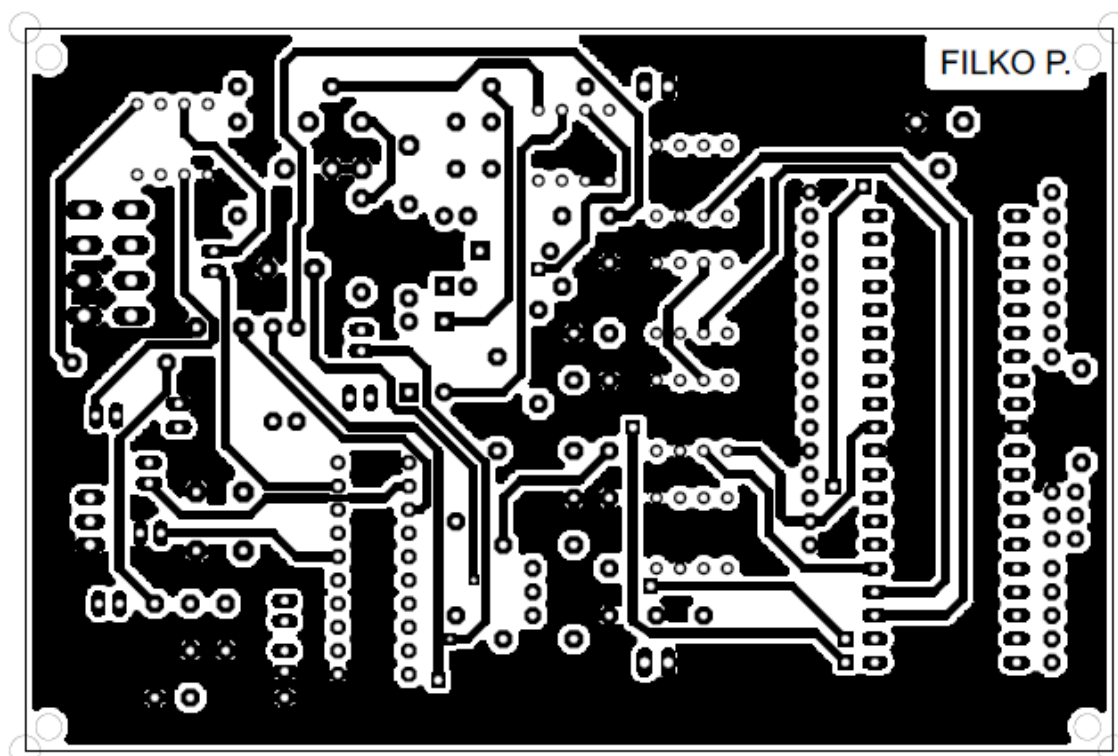


Obrázok II: Schéma zapojenia ovládacieho panelu

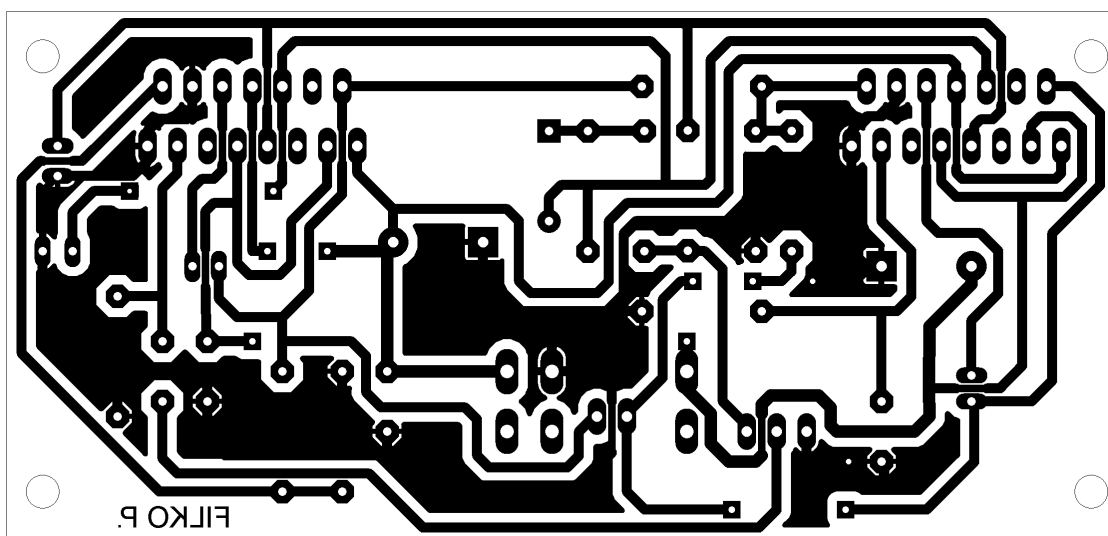
## Príloha B



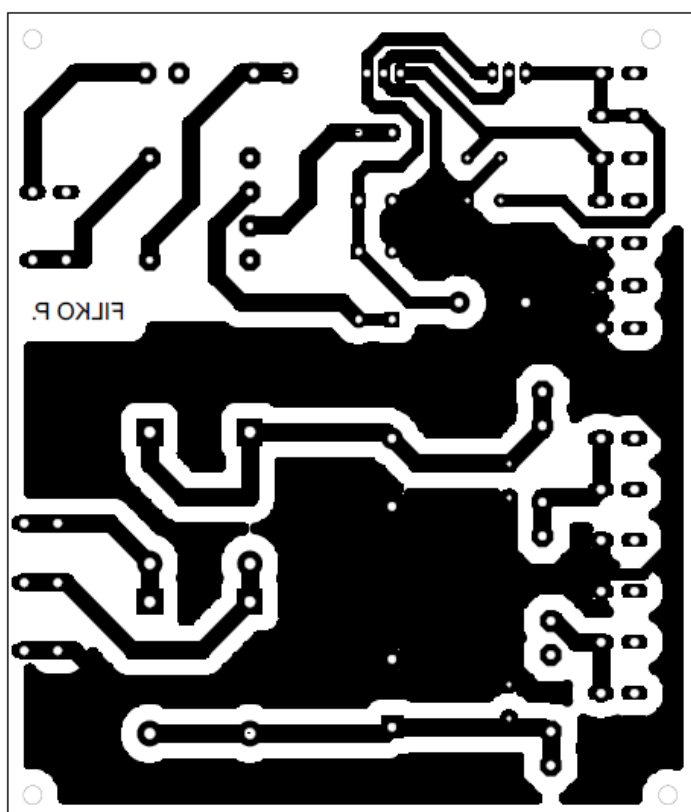
Obrázok IV: DPS korekčného predzosilňovača (bottom)



Obrázok III: DPS korekčného predzosilňovača (top)

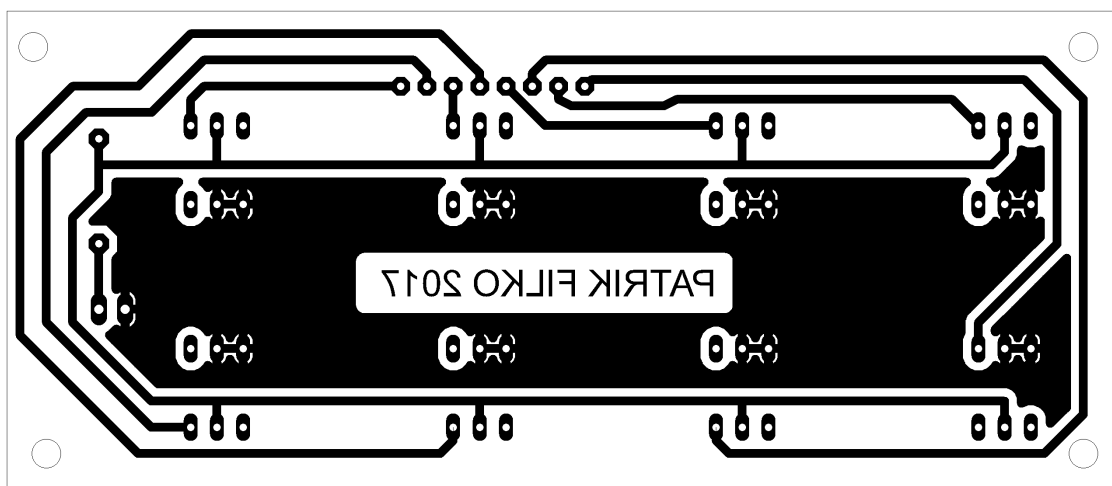


Obrázok V: DPS výkonového zosilňovača pre jeden kanál (bottom)



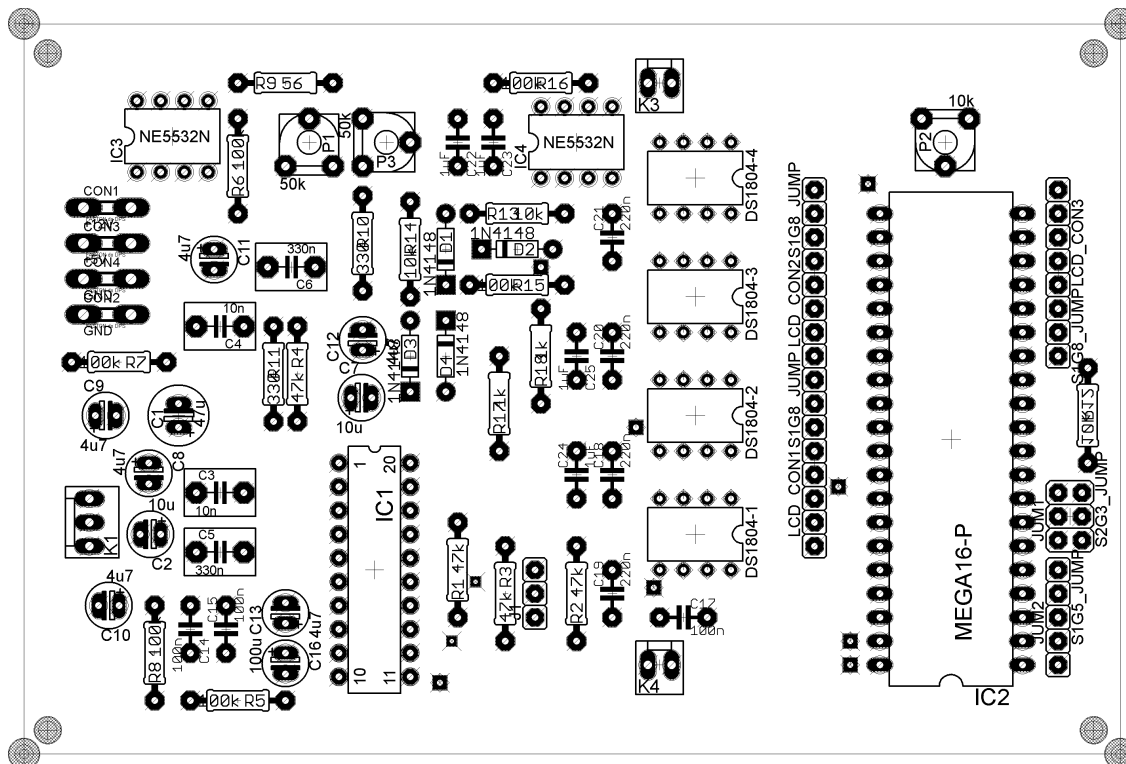
Obrázok VI: DPS zdroja napätia (bottom)



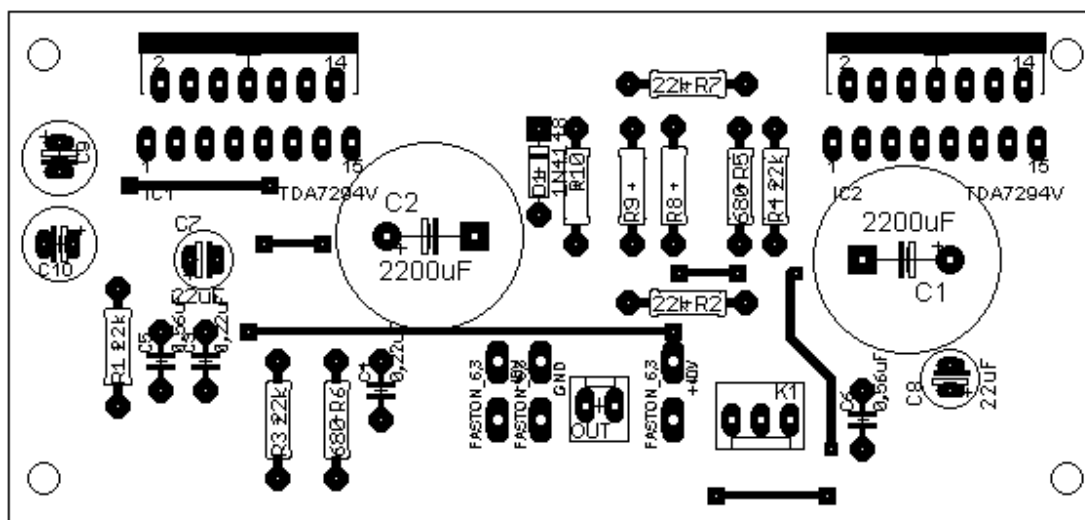


Obrázok VII: DPS ovládacieho panelu (bottom)

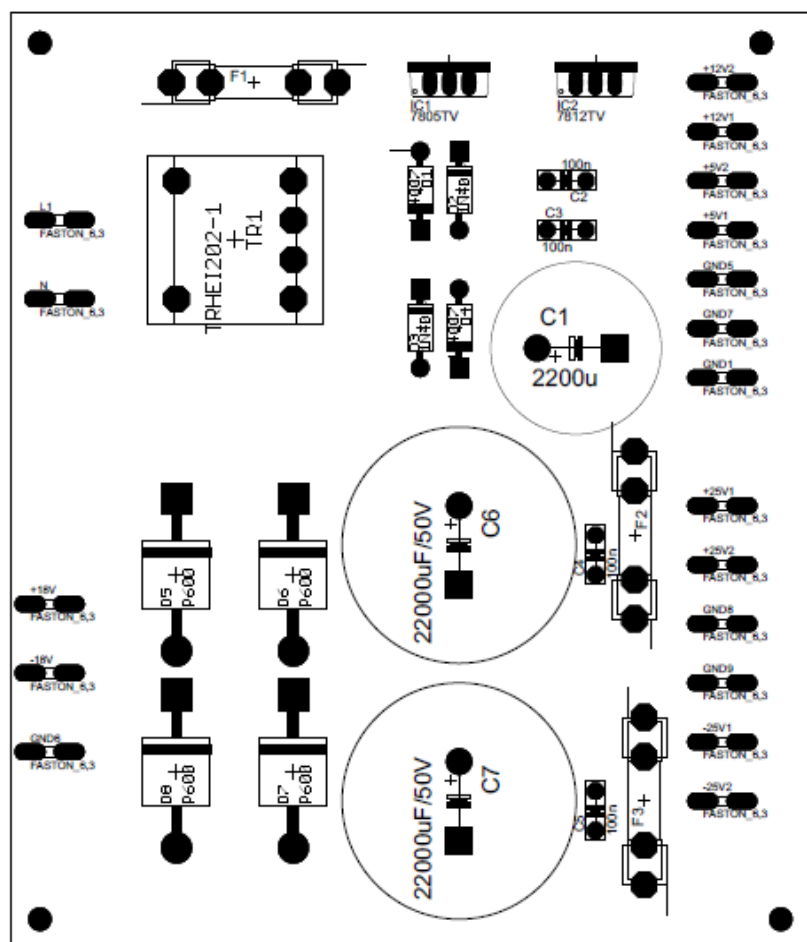
## Príloha C



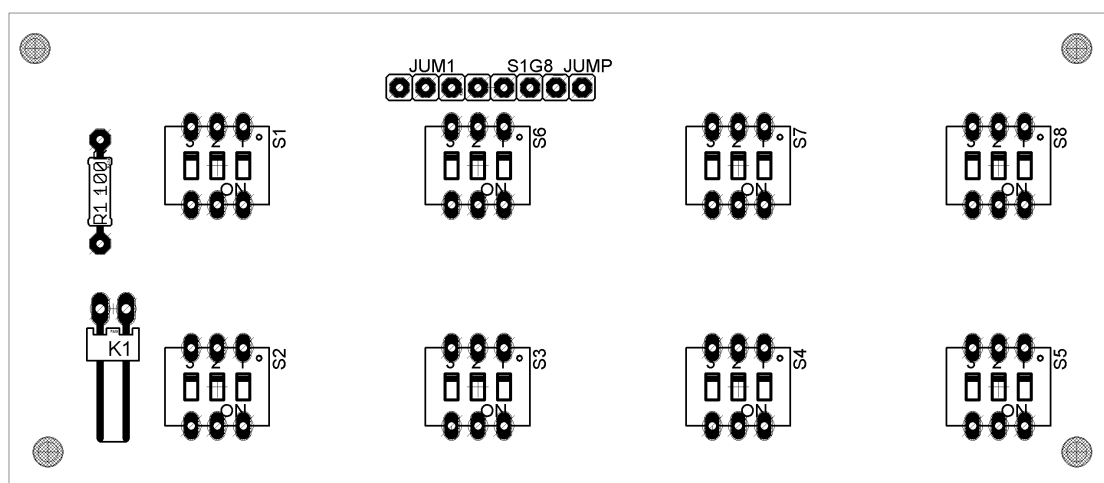
Obrázok VIII: Osadzovací plán predzosilňovača



Obrázok IX: Osadzovací plán výkonového zosilňovača pre jeden kanál



Obrázok X: Osadzovací plán zdroja napätia



Obrázok XI: Osadzovací plán ovládacieho panelu

## Príloha D

Tabuľka I: Zoznam súčiastok korekčného predzosilňovača

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
R1, R2, R3, R4	47k	R-10	metalizovaný rezistor
R5, R6, R7, R8	100k	R-10	metalizovaný rezistor
R9	56R	R-10	metalizovaný rezistor
R10, R11	330R	R-10	metalizovaný rezistor
P2	10K	CA9V	potenciometer 10K
C1	47u	RM 2,5	elektrolytický kondenzátor
C2, C7	10u	RM 2	elektrolytický kondenzátor
C3, C4	10n	RM 2,5	fóliový kondenzátor
C5, C6	330n	RM - 5	fóliový kondenzátor
C8, C9, C10, C11, C12, C13	4u7	RM 2	elektrolytický kondenzátor
C14, C15, C17	100n	RM 2	keramický kondenzátor
C16	100u	RM 2	elektrolytický kondenzátor
C18, C19, C20, C21	220n	RM - 5	keramický kondenzátor
CON1, CON2, CON3, CON4		6,3mm	FASTON
J1		S1G3	Konektory - kolíky - 1x3
JUM1		S2G3	Konektory - kolíky - 2x3
JUM2		S1G5	Konektory - kolíky - 1x5
K2, K3		PSH02 - 03P	konektory - vidlica
K1		PSH02 - 02P	konektory - vidlica
LCD_CON1, LCD_CON2, TLACIDLA_CON3		S1G8	Konektory - kolíky - 1x8
DS1804 - 1, 2, 3, 4		DIL8	Digitálne potenciometre
IC3		DIL8	Operačný zosilňovač
IC1		DIL20	Zosilňovač LM1036N
IC2		DIL40	Mikrokontrolér - ATmega 16

Tabuľka II: Zoznam súčiastok ovládacieho panelu

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8		DIP6	Tlačidlo P-PB61412L-104
R1	100R	RM - 10	metalizovaný rezistor
K1		PSH02-02	konektor - vidlica

Tabuľka III: Zoznam súčiastok výkonového zosilňovača pre jeden kanál

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
C1, C2	2200uF	RM - 5	elektrolytický kondenzátor
C3, C4	0,22uF	RM - 5	keramický kondenzátor
C5, C6	0,56uF	RM - 5	keramický kondenzátor
C7, C8	22uF	RM - 2	elektrolytický kondenzátor
C9, C10		RM - 2,5	elektrolytický kondenzátor
R1, R2, R3, R4, R7	22k	RM - 10	metalizovaný rezistor
R5, R6	680R	RM - 10	metalizovaný rezistor
R8, R9, R10		RM - 10	metalizovaný rezistor
OUT		PSH02 - 02	konektor - vidlica -1x2
K1		PSH02 - 03	konektor - vidlica -1x3
+40V, -40V, GND		6,3mm	FASTON
TDA7294V		Multiwatt 15	Výkonový zosilňovač TDA

Tabuľka IV: Zoznam súčiastok napájacieho zdroja

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
C1	2200uF	RM - 10	elektrolytický kondenzátor
C2 C3, C4, C5	100n	RM - 2,5	fóliový kondenzátor
C6, C7	20000uF	RM - 10	elektrolytický kondenzátor
D1, D2, D3, D4		RM - 10	Dioda 1N4937
D5, D6, D7, D8		RM - 20	Dioda P600
IC1		TO220	7805TV - stabilizátor napätia
IC2		TO220	7812TV - stabilizátor napätia
F1	350mA	Fuse_SHH	Poistka 5x20mm
F2, F3	5A	Fuse_SHH	Poistka 5x20mm
F4	6,3A	Fuse_SHH	Poistka 5x20mm
TR1			BV EI 306 2015 - transformátor
TR2			RT300 - 2x19V - transformátor
S1			Antivandal spínač HBGQ22-11EZ/B/12V/S